

PROGRAMME *SENTINELAS* : LES SCIENCES PARTICIPATIVES
POUR LE SUIVI DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LA CAATINGA

par
Constance Marty

essai présenté au Département de biologie
en vue de l'obtention du grade de maître en écologie internationale (M.E.I.)

Sous la direction de Monsieur John William Shipley

FACULTÉ DES SCIENCES
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Rimouski, Québec, Canada, octobre 2019

Sommaire

Les changements climatiques, réalité connue depuis maintenant plusieurs années, sont au cœur de l'actualité mondiale. En effet, les impacts négatifs commencent déjà à se faire sentir dans les différents écosystèmes planétaires et les prévisions ne sont pas très optimistes. De nombreux gouvernements commencent à mettre en place des plans stratégiques de suivi et d'adaptation pour tenter d'appréhender et d'anticiper la situation. Au Brésil, les deux biomes les plus vulnérables aux changements climatiques et à leurs impacts sont la Forêt Amazonienne et la Caatinga. Cette dernière correspond à la forêt tropicale sèche qui couvre environ 10% du territoire brésilien. Elle est unique, hétérogène et abrite plusieurs espèces endémiques. Elle reste cependant peu étudiée et préservée, limitant les possibilités d'adaptations face aux changements climatiques.

Pour répondre à cette problématique, cet essai propose d'allier science et éducation pour effectuer un suivi des changements climatiques à l'échelle de la Caatinga. Il présente les composantes fondamentales d'un programme de sciences participatives développé en milieu scolaire : le programme *Sentinelas*. Les sciences participatives intègrent des citoyens « non scientifiques professionnels » au processus de la recherche scientifique. Le programme *Sentinelas* peut permettre de récolter des données fiables et scientifiquement valables à long terme et sur la totalité du territoire couvert par la Caatinga. Il favorise également la sensibilisation et la conscientisation aux enjeux environnementaux en impliquant les jeunes dans la démarche scientifique.

Pour s'assurer de la réussite et de la pérennité d'un programme d'une telle ampleur, plusieurs points cruciaux sont à prendre en compte. La mobilisation et la gestion des parties prenantes, le choix de variables stratégiques, le développement de protocoles simples et précis, la gestion et l'analyse des données collectées ainsi que la vulgarisation, la divulgation des résultats et la promotion globale du programme sont des éléments déterminants. Dans le futur, la mise en place concrète de ce programme permettrait de rassembler les scientifiques et les citoyens dans l'ambition commune de suivi et d'adaptation aux changements climatiques.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier John William Shipley, mon directeur d'essai, pour ses commentaires et ses corrections avisées qui m'ont permis d'améliorer la qualité de mon essai. Je remercie aussi Caroline Cloutier, coordonnatrice du programme d'écologie internationale, pour ses conseils, ses réponses à mes nombreuses questions et sa patience tout au long de la maîtrise.

La rédaction de cet essai a été riche en enseignements et m'a permis d'apprendre à mieux connaître mes motivations, mes forces mais également mes faiblesses. Je voudrais donc également remercier Justine et Robin, sans qui ce projet ne serait probablement pas terminé. Ma sœur pour son écoute, son aide, son soutien, sa patience et sa capacité extraordinaire à me motiver à la rédaction. Robin pour ses relectures attentives et ses corrections.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont fait découvrir le Nord-Est brésilien et m'ont permis de développer ma réflexion sur les enjeux environnementaux associés à la Caatinga et les possibilités d'actions : Jarcilene Silva de Almeida Cortez, Tatiane Menezes, Josélia Menezes, Claudio Novaes et toutes les personnes de Floresta, jeunes et moins jeunes, qui m'ont offert de merveilleuses conversations et de beaux moments.

Finalement, je remercie infiniment mes parents, mes sœurs et ma famille en général pour leur soutien inconditionnel, même à 5000 kilomètres, et leur support moral infaillible.

Et finalement, merci à vous, qui prenez un peu de votre temps afin de lire cet essai. Bonne lecture!

Table des matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : LES SCIENCES PARTICIPATIVES AU SERVICE DU SUIVI DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	3
1.1 Les sciences participatives	3
1.1.1 Histoire, concept et définitions	4
1.1.2 Les sciences participatives en écologie	8
1.1.3 Les sciences participatives en milieu scolaire	12
1.2 Intérêt et apports des sciences participatives	14
1.2.1 Les « observ'acteurs » : contribution des citoyens à la recherche	15
1.2.2 Recherche collaborative gagnante pour tout le monde	16
1.2.3 Processus d'amélioration continue	18
1.3 Limites et défis des sciences participatives	18
1.3.1 Bénévoles « amateurs »	19
1.3.2 Mobilisation des acteurs	20
1.3.3 Le temps, l'organisation et l'argent	21
1.4 Pistes d'améliorations pour les sciences participatives	22
CHAPITRE 2 : LA CAATINGA DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	25
2.1 La Caatinga : biome singulier du Brésil	26
2.1.1 Dimension écologique	26
2.1.2 Dimension socioculturelle	32
2.1.3 Enjeux environnementaux de la Caatinga	33
2.2 Changements climatiques et leurs impacts dans la Caatinga	37
2.2.1 Prévisions climatiques	37
2.2.2 Impacts anticipés des changements climatiques dans la Caatinga	43
2.3 Freins aux transformations et à l'adaptation aux changements climatiques dans la Caatinga	45
2.3.1 Recherches et données scientifiques limitées pour le biome de la Caatinga	45
2.3.2 Gouvernance : gestion de l'adaptation aux changements climatiques	47

CHAPITRE 3 : PROGRAMME DE SCIENCE PARTICIPATIVE POUR LE SUIVI DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À L'ÉCHELLE DE LA CAATINGA	51
3.1 Présentation du programme <i>Sentinelas</i>	51
3.1.1 Analyse des opportunités et des menaces pour l'implantation d'un programme de science participative dans la Caatinga	53
3.1.2 Choix de la communauté cible du programme de sciences participatives.....	55
3.1.3 Structure du programme.....	58
3.1.4 Objectifs scientifiques, d'éducation et de sensibilisation	60
3.2 Principales étapes de mise en place et de suivi du programme <i>Sentinelas</i>	61
3.2.1 Les parties prenantes	62
3.2.2 Choix des variables et développement de protocoles	63
3.2.3 Gestion et analyse des données.....	64
3.2.4 Vulgarisation, promotion et diffusion des résultats	65
3.3 Une vision à long terme	67
CONCLUSION	69
RÉFÉRENCES	71
Annexe 1 : Climats semi-arides selon la classification de Köppen-Geiger	87
Annexe 2 : Exemple de protocole du programme Phénoclim	89
Annexe 3 : Exemples de documents d'aide pour les participants	94
Annexe 4 : Exemples d'exercices d'entraînement pour les participants	98

Liste des figures et tableaux

Figure 1.1 :	Niveau d'implication et de participation des citoyens dans les projets de sciences participatives.....	7
Figure 1.2 :	Avantages des sciences participatives.	14
Figure 2.1 :	Carte des biomes du Brésil.....	25
Figure 2.2 :	Différences paysagères entre la saison des pluies et la saison sèche dans la Caatinga.	27
Figure 2.3 :	Séries historiques de pluviométrie totale mensuelle de six stations météorologiques de la Caatinga.....	28
Figure 2.4 :	Cartes de la géomorphologie et de l'altimétrie de la Caatinga.	29
Figure 2.5 :	Carte des isohyètes dans la Caatinga.	30
Figure 2.6 :	Écorégions de la Caatinga.	30
Figure 2.7 :	Distribution géographique des impacts du feu, des routes, du changement d'usage des sols et des trois facteurs combinés dans la Caatinga en 2010.	36
Figure 2.8 :	Prédictions des anomalies annuelles de températures et de précipitations dans le futur (2071-2100) pour le Nord-Est du Brésil.....	39
Figure 2.9 :	Séries temporelles des anomalies de températures et de précipitations pour la région de la Caatinga.....	40
Figure 2.10 :	Carte des zones affectées et susceptibles d'être affectées par la désertification dans le Nord-Est du Brésil.....	42
Figure 2.11 :	Richesse spécifique floristique projetée et espèces menacées (27 espèces floristiques) à l'échelle de la Caatinga.....	50
Figure 3.1 :	Résumé des impacts des changements climatiques et de leurs répercussions sur la biodiversité et les écosystèmes de la Caatinga.	52
Figure 3.2 :	Analyse des opportunités et des menaces pour l'implantation d'un programme de science participative dans la Caatinga.	53
Figure 3.3 :	Résumé du programme <i>Sentinelas</i>	67
Figure 3.4 :	Recommandations pour pérenniser le programme <i>Sentinelas</i>	68
Tableau 1.1 :	Projets de sciences participatives en environnement, en écologie et liés au suivi des changements climatiques.....	10
Tableau 1.2 :	Projets de sciences participatives en milieu scolaire	13
Tableau 1.3 :	Bénéfices des programmes de sciences participatives pour les participants et les scientifiques impliqués.....	17
Tableau 1.4 :	Critères de réussite des programmes de sciences participatives et exemples de projets les appliquant déjà.....	23
Tableau 2.1 :	Programmes associés à la biodiversité et aux changements climatiques et organismes impliqués dans les projets.....	48
Tableau 3.1 :	Présentation générale du programme <i>Sentinelas</i>	52
Tableau 3.2 :	Distinction entre le système éducatif brésilien et québécois au niveau de l'enseignement maternel, primaire et secondaire	56
Tableau 3.3 :	Critères d'élaboration du programme de science participative <i>Sentinelas</i>	58

Liste des sigles, des symboles et des acronymes

ASA	<i>Articulação do Semi-Árido</i> . L'ASA est une organisation non gouvernementale qui réunit plus de 700 entités de la société civile pour lutter contre les effets de la sécheresse dans le pays.
CCST	Centre des Sciences du Système Terrestre (Traduction libre de : <i>Centro de Ciência do Sistema Terrestre</i>)
Cemaden	Centre National de surveillance et d'alertes des catastrophes naturelles (Traduction libre de : <i>Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais</i>)
CPTEC	Centre d'Études Météorologiques et Climatiques (Traduction libre de : <i>Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos</i>)
FFOM	Analyse des forces, faiblesses, opportunités et menaces
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Traduction de l'anglais : <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ou IPCC)
IA	Indice d'aridité
INPE	Institut National de Recherche Spatiale (Traduction libre de : <i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>)
MMA	Ministère de l'environnement (Traduction libre de : <i>Ministério do Meio Ambiente</i>)
ODS	Observatoire des saisons
OPAL	Laboratoires à ciel ouvert (Traduction libre de : <i>Open Air Laboratories</i>)
OPJ	Observatoire des papillons de jardins
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement (Traduction de l'anglais : <i>United Nations Environment Programme</i> ou UNEP)
Sudene	Surintendance du développement du Nord-Est du Brésil (Traduction libre de : <i>Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste</i>)

Lexique

Caatinga	Forêt tropicale sèche située dans le Nord-Est du Brésil et caractérisée par un climat semi-aride, de faibles précipitations et une végétation xérophile (Leal et al., 2003; Leal et al., 2005; Silva et al., 2017).
Citoyen	Membre d'un État considéré du point de vue de ses droits et devoirs civils et politiques. Dans cet essai, le terme citoyen est utilisé pour parler des acteurs de la société civile « non scientifiques professionnels » (Alan Irwin, 1995).
Déficit hydrique	État de sécheresse causé par une pluviométrie inférieure à l'évapotranspiration potentielle (évapotranspiration du sol et transpiration des espèces végétales) d'un milieu.
Désertification	Processus de transformation progressive d'une zone aride ou semi-aride en désert par suite d'un manque prolongé de précipitations et/ou d'une mauvaise gestion des sols.
Espèce xérophile	Se dit d'une espèce adaptée au déficit hydrique.
Évapotranspiration potentielle	Quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau.
Indice d'aridité	Valeur numérique caractérisant le degré de sécheresse d'un climat en fonction de divers éléments climatiques. L'indice d'aridité utilisé dans cet essai et celui proposé par le PNUE et calculé à partir de l'évapotranspiration potentielle et la moyenne annuelle des précipitations (UNEP, 1992).
Phénologie	Étude des phénomènes périodiques chez les végétaux et les animaux, en relation avec les variations climatiques saisonnières.
Science participative	Science caractérisée par la collaboration entre scientifiques et citoyens bénévoles à des projets de recherche dans le but de collecter un volume de données pertinent et suffisant sur une thématique précise, sur la base d'un protocole scientifique reconnu.

Introduction

Les changements climatiques sont maintenant une préoccupation à l'échelle mondiale. En effet, les quatrième et cinquième rapports du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), les deux derniers en date, concluent que les changements climatiques sont sans équivoque, affectent tous les écosystèmes de la planète et sont principalement associés aux activités humaines (IPCC, 2007, 2014). En effet, les impacts négatifs des changements climatiques sont déjà perceptibles sur la biodiversité (Root et al., 2003). De plus, les projections climatiques indiquent une modification de la distribution des biomes dans le monde et une augmentation globale de l'aridité (IPCC, 2007, 2014). De manière générale, les régions arides seront touchées par les changements climatiques avec une augmentation des températures et une diminution des précipitations (Miles et al., 2006). Elles connaîtront une augmentation de la durée et de l'intensité de leurs périodes de sécheresses. Dans le même temps, les événements extrêmes, comme les inondations fortement présentes pendant la saison des pluies, augmenteront aussi (Silva et al., 2017). Le phénomène de désertification va également prendre de l'ampleur (Iqbal et al., 2019).

La Caatinga, forêt tropicale sèche située au Nord-Est du Brésil, est une des régions brésiliennes, avec la forêt amazonienne, qui sera la plus affectée par les changements climatiques (Marengo, 2008; Rito et al., 2017). Ce biome ayant pendant longtemps été considéré comme improductif et pauvre en biodiversité, peu d'études scientifiques permettant d'observer et de quantifier les changements ont été réalisées à ce jour (Leal et al., 2003; Giuliatti et al., 2004; Silva et al., 2017). Cependant, les problématiques environnementales associées aux sécheresses rudes et prolongées ainsi qu'aux activités humaines sont bien réelles (Leal et al., 2003; Silva et al., 2017). En 2017, le Ministère de l'Environnement brésilien considérait que 15% de la Caatinga était menacé par la désertification (Ministério do Meio Ambiente, 2017). Silva et al., (2017) estiment quant-à-eux que plus de 60% de la Caatinga est altérée par les activités anthropiques. Or, ce biome, riche en biodiversité et en espèces endémiques (Giuliatti et al., 2004), reste actuellement peu étudié, protégé et valorisé (Leal et al., 2003; Silva et al., 2017; Zanin et al., 2017). L'étude et le suivi des changements climatiques ainsi que la préservation de la Caatinga constituent l'un des plus grands défis actuel de la science brésilienne (Leal et al., 2003; Silva et al., 2017).

Dans ce contexte, les sciences participatives peuvent être une approche intéressante. Elles permettent d'inclure les citoyens « non scientifiques professionnels » dans le processus de recherche scientifique (Kullenberg et Kasperowski, 2016; Hecker et al., 2018). Cette démarche a un double bénéfice : la sensibilisation des participants et la collecte de nombreuses données à grande échelle et à long terme (Dickinson et al., 2012; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kobori et al., 2016). Cette approche scientifique est de plus en plus développée et utilisée dans le monde, principalement dans les pays européens et nord-américains, notamment pour l'étude et le suivi des changements climatiques (Conrad et Hilchey, 2011; Societize, 2013; Comandulli et al., 2016).

Basé sur cette approche, le présent essai expose les composantes fondamentales d'un programme de science participative applicable au niveau de l'enseignement fondamental 2 (élèves de 11 à 14 ans), à l'échelle de la Caatinga (Brésil). Ce sont les conditions sous-jacentes essentielles de réussite d'un tel programme qui sont présentées, autrement dit la base sur laquelle doit s'appuyer le développement d'un programme permettant d'allier sensibilisation et prise de données scientifiques utiles pour le suivi des changements climatiques dans la Caatinga. Le premier chapitre introduit et explique le concept de sciences participatives, leurs applications, possibilités, limites et défis. Cette première partie démontre l'intérêt d'utiliser la science participative pour le suivi et l'adaptation aux changements climatiques. Elle permet également de déterminer quels types de projets et quelles méthodes peuvent être utiles pour l'implantation d'un programme de science participative en milieu scolaire. Le deuxième chapitre présente la Caatinga dans le contexte actuel des changements climatiques. Cet état des lieux, à la fois social, culturel, politique et environnemental, aborde les principales problématiques limitant l'adaptation aux changements climatiques de la région. Il fait également ressortir le manque de connaissances et de données scientifiques disponibles actuellement pour effectuer un suivi approprié des impacts des changements climatiques à long terme. Le troisième chapitre utilise les notions traitées au premier chapitre et tient compte du contexte énoncé au deuxième chapitre pour proposer les composantes fondamentales nécessaires à la création d'un programme de science participative. Après avoir déterminé les objectifs poursuivis, à la fois scientifiques et pédagogiques, cette dernière partie développe les bases du programme de sciences participatives *Sentinelas*, appliqué à la Caatinga et adapté pour permettre sa mise en place dans le milieu scolaire brésilien.

Chapitre 1

Les sciences participatives au service du suivi des changements climatiques

« Les sciences participatives sont un phénomène mondial en augmentation, très fédérateur et avec des finalités diverses et contrastées » (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

En se basant sur des programmes de sciences participatives existants en écologie, le chapitre 1 explore les possibilités et les limites d'une telle approche. Il permet également de distinguer quel type de projet ou quelles méthodes appliquées en sciences participatives peuvent être intéressants et utiles dans le cadre du suivi des changements climatiques. Pour cela, le concept de sciences participatives est tout d'abord abordé et des projets appliqués au domaine de l'écologie sont présentés. Les intérêts et les apports mais aussi les limites et les défis des sciences participatives sont par la suite exposés.

1.1 Les sciences participatives

Bien que des approches différentes existent, les sciences participatives sont communément définies comme la production de connaissances scientifiques à laquelle des individus « non scientifiques professionnels » prennent part volontairement (Irwin, 1995; Cohn, 2008; Couvet et al., 2008; Silvertown, 2009; Wiggins et Crowston, 2011; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Ce type d'activité scientifique, généralement élaborée par des scientifiques professionnels, répond aux intérêts et besoins des chercheurs mais également à ceux des citoyens participants, qui contribuent activement à la collecte, à l'analyse et à la diffusion de données (Cooper, Dickinson, Phillips et Bonney, 2007; Cohn, 2008; Silvertown, 2009; Haklay, 2013). Ces derniers le font principalement pour leur plaisir personnel, acquérir de nouvelles connaissances, contribuer à la résolution de problématiques scientifiques ou encore obtenir des réponses à leurs préoccupations (Silvertown, 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Cette collaboration permet également de collecter une grande quantité de données, réparties sur un large territoire et s'étalant sur une longue période de temps (Bonney et al., 2009). Les projets de sciences participatives peuvent être pilotés par des chercheurs, des institutions ou des associations (Mathieu, 2011).

1.1.1 Histoire, concept et définitions

Historiquement, les citoyens « non scientifiques professionnels » ont toujours participé à la recherche scientifique : les premières découvertes scientifiques étaient faites par des individus qui s'intéressaient aux sciences mais n'étaient pas des professionnels (Silvertown, 2009; Mathieu, 2011; Haklay, 2013). Les premiers scientifiques (appelés « philosophes naturels » à l'époque) payés pour faire de la recherche scientifique sont apparus au 17^{ème} siècle (Haklay, 2013) et la professionnalisation de la science s'est faite principalement au 19^{ème} et 20^{ème} siècle (Silvertown, 2009; Mathieu, 2011; Haklay, 2013). Plus la science se spécialisait, plus elle se professionnalisait et plus la distinction entre les scientifiques et les citoyens, considérés comme non scientifiques, devenait importante (Alan Irwin, 1995; Haklay, 2013). Pourtant, dès les années 1820-1830 certains organismes, comme le *Mechanics' Institute* (établissements d'enseignement anglais créés à l'origine pour dispenser une éducation aux adultes, en particulier dans des matières techniques) ont commencé à mettre en place des programmes pour permettre de rapprocher le domaine scientifique de la "classe populaire". La science restait néanmoins principalement développée par les scientifiques de formation (Silvertown, 2009; Haklay, 2013). Dans les années 1920, l'intérêt d'écrire de la littérature scientifique accessible au public et de la divulguer dans des musées, des articles de journaux et des émissions de télévision et de radio a été mis en avant (Alan Irwin, 1995). Cependant, ces échanges se faisaient principalement unilatéralement, les chercheurs étant encouragés à s'impliquer dans des activités publiques et à "disséminer" la science (Bonney et al., 2009). La compréhension et l'acceptation de la science par les citoyens étaient valorisée, mais pas leur participation (Alan Irwin, 1995).

Le premier projet de science participative reconnu est le *Christmas Bird Count*, un décompte ornithologique ayant lieu chaque année aux États-Unis depuis 1900 (Silvertown, 2009). Néanmoins, c'est autour des années 1980 que le public a commencé à pouvoir s'impliquer réellement dans la recherche scientifique (Bonney al., 2009) et, depuis une quinzaine d'années, les sciences participatives connaissent un essor considérable (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Elles deviennent accessibles à tous et sont un moyen de rapprocher les sphères de la science et du public, par la participation citoyenne aux activités de recherche (Alan Irwin, 1995; Silvertown, 2009; Mathieu, 2011). Cette diffusion est en partie liée au développement des technologies et de

l'internet qui facilitent la communication et l'accès aux connaissances (Silvertown, 2009; Haklay, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). L'augmentation des temps libres, associée à la réduction du temps de travail, permet aussi de dégager du temps pour des loisirs, dont les sciences participatives font partie (Haklay, 2013). En effet, un plus grand nombre de personnes ayant reçu une éducation en science s'y intéressent, hors du cadre professionnel, et souhaitent être parties prenantes de la production de connaissances scientifiques (Haklay, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Les sciences participatives sont présentes dans de nombreux domaines : agriculture, écologie et environnement, biologie, géographie et géomatique, santé, sciences sociales, sciences de l'éducation, arts, ingénierie, chimie, physique, mathématiques, économie et finance, énergie, numérique, astronomie, archéologie, management et business (WMO, 2001; BBC, 2006; Silvertown, 2009; Dickinson et al., 2012; Haklay, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kullenberg et Kasperowski, 2016; Lukyanenko et al., 2019).

En général, les projets de science participative sont de deux sortes : certains sont instaurés par des scientifiques, dans lesquels les citoyens permettent principalement la collecte de données à grande échelle. Par exemple, l'application *AirProbe* a été développée par des entreprises pour le suivi de la pollution de l'air. Les citoyens collectent les données et voient en temps réel le niveau de pollution du lieu où ils se trouvent (Souto, 2014; EveryAware, 2019). Le projet *CurieuzeNeuzen* en Belgique, lancé par le biogéochimiste Filip Meysman, permet quant à lui aux participants de collecter des données sur les concentrations de dioxyde d'azote « à hauteur de nez » (Aisling Irwin, 2018). En revanche, d'autres projets sont amorcés par des citoyens. Ceux-ci s'apparentent à de la gestion de l'environnement, notamment lorsqu'un problème, comme la pollution de l'air, la pollution sonore (aux abords d'aéroports par exemple) ou un conflit lié à l'environnement, survient dans une ville ou une communauté. Les citoyens cherchent alors à obtenir des données scientifiques pour faire valoir leurs droits et se faire entendre des décideurs (Haklay, 2013). Ainsi, à Fos sur Mer, en France, un projet de suivi de la pollution de l'air causée par les industries alentours a vu le jour suite aux préoccupations des citoyens pour leur santé (Isnard-Dupuy et Hennequin, 2019).

Bien que le concept existe depuis longtemps et se répande de plus en plus, le terme de "sciences participatives" reste toutefois très récent et méconnu. En 2009, seulement 56 articles abordant le thème de la science participative étaient répertoriés dans la base de données Web of Science et c'est seulement à partir de 2015 qu'on note une augmentation importante des publications sur le sujet, pour atteindre 1 935 en 2016 (Silvertown, 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kullenberg et Kasperowski, 2016). De plus, une partie des résultats issus de données collectées par des volontaires ne sont pas encore associées aux sciences participatives et d'autres ne se retrouvent que dans la "littérature grise" (Silvertown, 2009). Ce sont les États-Unis et les pays européens qui publient la majorité des articles de sciences participatives (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

De manière générale, définir les sciences participatives n'est pas chose facile (Haklay, 2013). Plusieurs termes et définitions existent : en français on trouve les termes « sciences participatives », « sciences collaboratives », « sciences citoyennes » (Office québécois de la langue française, 2014), on parle aussi de « recherches ou inventaires participatifs » ou encore de « *crowdsourcing* » et d'« *open science* » (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Ces derniers termes proviennent de l'anglais, où l'on retrouve aussi les notions de « *citizen science* », « *open science* », « *collaborative science* », « *public engagement* », « *participatory research* », « *community based research* », « *participatory experiments* », « *crowd-sourcing* » et « *collective intelligence* » (Socientize, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Dai, Shin et Smith, 2018). Les interprétations de tous ces termes varient aussi en fonction des auteurs, des organismes et des institutions qui les utilisent. Par exemple, le terme de « *citizen science* » peut être utilisé à la fois pour parler de la collecte de données faites par des bénévoles, ou bien de la participation des citoyens en amont, pour la définition des projets de recherche. Ces subtilités peuvent induire une certaine confusion et limitent la divulgation des sciences participatives (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Pour tenter de clarifier et d'organiser ces concepts, plusieurs auteurs ont développé des typologies (Cooper et al., 2007; Wilderman, 2007; Wiggins et Crowston, 2011; Couvet et Teyssède, 2013; Haklay, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Elles peuvent être basées sur les caractéristiques des projets. Wiggins et Crowston (2011) ont, de ce fait, identifié cinq catégories en fonction des objectifs principaux et de l'importance de l'environnement physique pour la

participation : 1) action ; 2) conservation ; 3) recherche ; 4) virtuel (projets entièrement basés sur l'usage des technologies de l'information et de la communication) ; 5) éducation. En se basant sur le niveau d'implication et de participation des citoyens dans les projets scientifiques, Haklay (2013) met quant à lui en avant quatre « niveaux » de science participative. La Figure 1.1 s'inspire de cette typologie, tout en la complétant avec d'autres sources (Cooper et al., 2007; Wilderman, 2007; Grey, 2009; Wiggins et Crowston, 2011; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Les niveaux d'implication des volontaires varient d'un engagement minimal (simple prise de données ou partage de temps d'ordinateur) : le « *crowdsourcing* » (Howe, 2006), à un partage des responsabilités et des productions de résultats avec les scientifiques : la « collaboration complète » (Haklay, 2013). Une majorité des projets publiés se situent actuellement au niveau 2, à savoir « intelligence partagée / distribuée » (Haklay, 2013). À ce niveau d'implication, les participants suivent en général un entraînement de base, passent un test donnant aux scientifiques une idée de la qualité des résultats qui vont être fournis, puis collectent et/ou interprètent des données. Au sein d'un même projet, les participants peuvent aussi se retrouver à différents niveaux en fonction de leur engagement, dans la limite de ce que le projet permet comme implication (Haklay, 2013).

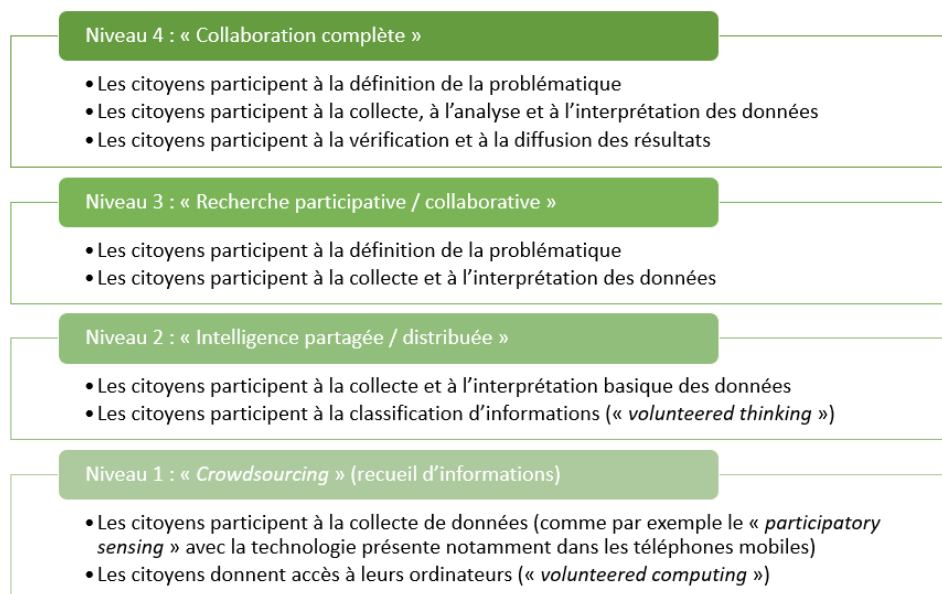


Figure 1.1 : Niveau d'implication et de participation des citoyens dans les projets de sciences participatives.

Adapté de : Haklay, (2013)

1.1.2 Les sciences participatives en écologie

Parmi les nombreux domaines d'études des sciences participatives cités précédemment, un des principaux champs d'application est celui regroupant la biologie, les sciences de la conservation et l'écologie (Dickinson et al., 2012; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kobori et al., 2016; Kullenberg et Kasperowski, 2016; Dai et al., 2018). Les citoyens participent habituellement à la collecte et la classification des données (Kullenberg et Kasperowski, 2016; Dai et al., 2018) dans des projets divers, notamment liés aux changements climatiques, à la biologie de la conservation, à la restauration écologique, au suivi des espèces envahissantes, à la surveillance de la qualité de l'air et de l'eau ou encore à l'écologie des populations (Silvertown, 2009; Dickinson et al., 2012; Kobori et al., 2016). Dans la majorité des cas, les projets sont axés sur le suivi d'une espèce, comme des arbres ou des oiseaux, ou d'une variable physique, comme les saisons (Julliard, Jiguet et Couvet, 2004; Jondreville et al., 2018; Tela Botanica, 2019). Le Tableau 1.1 présente une partie des projets de sciences participatives existant actuellement en écologie, en environnement et liés au suivi des changements climatiques. Bien que non-exhaustif, il met en évidence la diversité des projets et l'intérêt croissant pour les sciences participatives.

Le *Christmas Bird Count* est un des meilleurs exemples de projets de science participative s'inscrivant dans la durée et couvrant un grand territoire. Cette étendue spatiale et temporelle a permis la collecte d'une grande quantité de données et la publication de plus de 300 articles scientifiques depuis sa mise en place en 1900 (Silvertown, 2009). Le décompte des différentes espèces d'oiseaux, répété chaque année, a donné lieu à une diversité d'études scientifiques, notamment sur la dynamiques des populations, l'écologie des communautés, la biogéographie mais aussi les méthodes de recensement (Silvertown, 2009). Depuis son lancement en 2002, la plateforme d'observation d'oiseau eBird a quant-à-elle permis la production de plus de 90 articles et chapitres de livres, notamment sur l'ornithologie, l'écologie, les changements climatiques et la modélisation statistique (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Le *volunteered computing*, ou prêt de temps d'ordinateurs personnels, permet quant à lui d'exécuter des modèles climatiques sur des ordinateurs personnels et ainsi d'améliorer les prédictions climatiques (University of Oxford, Oxford e-Research et Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, 2019). D'autres projets utilisent les données recueillies par des citoyens pour observer les réponses de certaines espèces aux changements de leur environnement (Silvertown, 2009). La combinaison des données acquises par des projets de sciences citoyennes avec d'autres expériences scientifiques permettent aussi d'analyser, d'expliquer et de prévoir la répartition spatiale et temporelle d'espèces et ainsi de faire des scénarios de biodiversité (Couvet et al., 2011). Les sciences participatives aident donc les scientifiques à traiter les problèmes de biodiversité, notamment grâce à la définition d'indicateurs, le suivi de l'état de la biodiversité et l'élaboration de scénarios pour anticiper et évaluer les conséquences de différentes politiques (Couvet et al., 2008).

Tableau 1.1 : Projets de sciences participatives en environnement, en écologie et liés au suivi des changements climatiques. La liste présentée est non-exhaustive mais regroupe une partie des projets et montre leur diversité. La typologie utilisée est celle présentée dans la Figure 1.1. Les projets réalisés au Brésil sont en gras dans le tableau. Les sites internet associés aux projets se retrouvent dans les références.

Projet	Date de début du projet	Pays	Typologie
Projets en environnement et écologie			
<u>Christmas Bird Count</u> : Décompte d'oiseaux réalisé chaque année par des volontaires lors d'une journée en décembre (Silvertown, 2009)	1900	Amérique du Nord (principalement les États-Unis)	« Crowdsourcing »
<u>Butterfly Count</u> : Décompte de papillons réalisés principalement en juillet pour effectuer la suivi de papillons en Amérique du Nord (NABA, 2017)	1993	Amérique du Nord (États-Unis, Canada et Mexique)	« Crowdsourcing »
<u>Monarque sans frontière</u> : Projet permettant aux élèves d'élever, de marquer puis de relâcher des papillons Monarque qui seront par la suite suivi pendant leur migration (Insectarium de Montréal, 2019b) Ce projet est associé au projet <u>Mission Monarque</u> qui permet aux citoyens de répertorier des œufs, des chenilles, des chrysalides et des papillons (Insectarium de Montréal, 2019a)	1994	Canada	Entre : « Crowdsourcing » et « Intelligence partagée/distribuée »
<u>Reef Check</u> : Projet impliquant des volontaires pour le suivi des barrières de corail (Reef Check, 2019)	1996	Mondial	« Crowdsourcing »
<u>Vigie-Nature</u> : Observation standardisée et suivi de l'état de la biodiversité métropolitaine (Julliard, 2017; VigieNature, 2019)	2006	France	« Crowdsourcing »
<u>Wiki Aves</u> (WikiAves, 2019) <u>eBird Brasil</u> (Big Day Brasil, 2017; eBird Brasil, 2018) <u>Projeto Cidadão Cientista</u> (Save Brasil, 2019)	Projets sur le recensement d'espèces d'oiseaux 2008 2010 2014	Brésil	« Crowdsourcing »
<u>The Evolution MegaLab</u> : Collecte de données sur deux espèces d'escargots, basée sur le polymorphisme (couleur des coquilles) (Silvertown, 2009)	2009	Europe	Entre : « Crowdsourcing » et « Intelligence partagée/distribuée »
<u>Survivors</u> : Des collégiens prennent part à une expérimentation en pépinière pour comprendre comment de jeunes hêtres survivent à des modifications sévères (eau-carbone-azote) (INRA, 2015, 2016; Programme REPERE, 2016)	2014	France	Entre : « Intelligence partagée/distribuée » et « Recherche participative/collaborative »

Tableau 1.1 : Projets de sciences participatives en environnement, en écologie et liés au suivi des changements climatiques (Suite)

Projet	Date de début du projet	Pays	Typologie
65 millions d'observateurs : Les observations des participants permettent aux chercheurs de disposer d'un grand nombre de données pour étudier l'environnement (Muséum national d'Histoire naturelle, 2018).	2015	France	« Recherche participative/collaborative »
Découverte d'une nouvelle espèce de serpent au Brésil (Mata Atlantica) grâce à la participation de la communauté locale (BláBláLogia, 2018)	2018	Brésil	« Crowdsourcing »
<i>Instituto VerdeCoral</i> : Institution qui propose plusieurs programmes alliant scientifiques, élèves et communautés locales dans des projets liés à l'écologie (Instituto VerdeCoral, 2019)	ND	Brésil	Entre : « Intelligence partagée/distribuée » et « Recherche participative/collaborative »
Projets axés sur les effets des changements climatiques			
<i>Shore Thing Project</i> : Surveillance des côtes rocheuses pour enregistrer la distribution et l'abondance des indicateurs de changement climatique et des espèces non indigènes (The Conservation Volunteers, 2019)	2006	Royaume-Uni	« Crowdsourcing »
<i>L'observatoire des saisons</i> : Programme de suivi des changements climatiques par des observations phénologiques (Tela Botanica, 2019)	2006	France	« Crowdsourcing »
<i>Mass experiment</i> : Des élèves aident des chercheurs dans la collecte de données dans plusieurs domaines, notamment pour le suivi des changements climatiques (Vetenskap & Allmänhet, 2019)	2009	Suède	« Crowdsourcing »
<i>Redmap</i> : Prise données sur les espèces marine, à l'aide d'une application, permettant leur suivi (IMAS, 2019)	2009	Australie	« Crowdsourcing »
<i>Leo Network</i> : Permet le partage d'informations sur le climat et d'autres changements de l'environnement (LEO Network, 2017)	2012	Mondial	« Crowdsourcing »
<i>eOceans</i> : Prise de données sur le milieu marin, permettant un suivi temporel et spatial des espèces (Ward-Paige, 2018)	2014	Mondial	« Crowdsourcing »
« C3 » Climate Change Challenge : Sélection de projets faisant émerger des solutions liées à la compréhension, la prévention et l'adaptation aux changements climatiques (Météo France, IGN, CNES et Etalab, 2015)	2015	France	« Recherche participative/collaborative »
<i>Teatime4Science</i> : Des sachets de thé, enterrés pendant 3 mois, permettent de fournir des informations sur le cycle global du carbone et d'améliorer la modélisation du climat (Tea Bag Index, 2016)	2016	Mondial	Entre : « Crowdsourcing » et « Intelligence partagée/distribuée »

1.1.3 Les sciences participatives en milieu scolaire

Bien qu'une grande majorité des projets de sciences participatives aient une visée éducative et de sensibilisation du public, peu de projets mis en place en milieu scolaire et impliquant activement les élèves sont à ce jour répertoriés (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Certains organismes comme l'Observatoire des Saisons, en France, proposent des activités réalisables chez soi, en groupe ou en classe (Tela Botanica, 2019). Le programme « J'adopte un cours d'eau » du Groupe d'éducation et d'écovigilance de l'eau (G3E) inclue également les élèves du primaire, secondaire et collégial en plus de tout citoyen désirant participer à la surveillance de cours d'eau (G3E, 2019). Il existe aussi des projets spécifiquement développés pour le milieu scolaire comme le « Projet Survivors » (REPERE, 2016), et « *Cemaden Educação* » (Cemaden, 2019a). Le Tableau 1.2 présente plus en détail ces quatre programmes.

D'un point de vue théorique, Houllier et Merilhou-Goudard (2016) relatent sept composantes plus spécifiques aux sciences participatives appliquées en milieu scolaire :

1. La prise en compte des intervenants, des établissements et des programmes scolaires ;
2. L'anticipation des contraintes administratives et réglementaires ;
3. La formation et l'apport régulier d'informations de tous les parties prenantes impliqués (professeurs, élèves, scientifiques, bénévoles) ;
4. L'inclusion de tous les élèves dans le processus et la lutte contre l'autocensure (principalement celle des élèves) ;
5. L'élaboration de projets multidisciplinaires mobilisant plusieurs enseignants ;
6. L'appui de référents au niveau du gouvernement et de ses structures partenaires pour surmonter les contraintes organisationnelles;
7. Des moyens financiers adaptés.

Tableau 1.2 : Projets de sciences participatives en milieu scolaire

Nom du projet :	<i>Projet Survivors</i> (France) (REPERE, 2016)	<i>Cemaden Educação</i> (Brésil) (Cemaden, 2019a)	<i>Observatoire des Saisons</i> (France) (Tela Botanica, 2019)	<i>J'adopte un cours d'eau</i> (Canada) (G3E, 2019)
Durée :	3 ans (2014 à 2016)	Il a été mis en place en 2014 et il est en phase d'essai	Le programme dure depuis 13 ans (il a commencé en 2006)	Le programme dure depuis 19 ans (il a commencé en 2000)
Thème :	Étude des capacités de survie des arbres face à des contraintes environnementales extrêmes : comprendre comment de jeunes hêtres survivent à des modifications sévères de leur fonctionnement eau-carbone-azote	Projet contribuant à la création d'une culture de la perception des risques de catastrophes naturelles dans le contexte plus large de l'éducation environnementale et de la construction de sociétés durables et résilientes	Étude de phénomènes périodiques chez les végétaux et les animaux en relation avec les changements des saisons (phénologie), par exemple : floraison et fructification des arbres, coloration des feuilles en automne, etc.	Étude de l'environnement naturel aquatique avec la réalisation de diagnostics de la santé global de cours d'eau. Cela permet également de documenter l'impact des changements climatiques sur ces écosystèmes aquatiques
Personnes impliquées :	- 80 élèves de 12 à 15 ans (3 classes), - Leurs professeurs (notamment biologie et mathématiques) - Chercheurs de l'INRA	- Élèves de <i>Ensino Médio</i> (environ 15 à 17 ans) - Leurs enseignants - Chercheurs de différentes universités	- Établissements scolaires - Associations - Groupes de particuliers / citoyens	- Élèves et étudiants (primaires, secondaires et collégial) - Enseignants - Intervenants qualifiés - Particuliers / citoyens
Implication des élèves :	Chaque élève était « parrainé » à un arbre et l'ont défeuillé à 75% selon un protocole précis. Ils ont également vu les instruments et processus scientifiques utilisés pour l'étude et ont ensuite travaillé sur les données récoltées (croissance, surface foliaire, etc.)	Chaque école participante devient un espace pour faire de la recherche et un suivi du climat, partager des connaissances, comprendre les catastrophes naturelles et émettre des alertes au besoin	Les élèves, supervisés par leurs enseignants, prennent des données saisonnières sur différentes espèces de plantes, d'arbres et/ou d'animaux (sélectionnées parmi une liste préétablie)	Les élèves collectent des données relativement à trois volets : - Analyses physicochimiques et bactériologiques de l'eau - Étude de macroinvertébrés benthiques - Étude de la santé des poissons
Retombées :	- Données scientifiques exploitables sur le thème abordé et pour élaborer, valider et tester des indicateurs du changement climatique - Connaissances au niveau pédagogique et méthodologique - Test sur le niveau d'appropriation de la démarche scientifique - Réalisation d'un court film sur le projet	- Implication et sensibilisation du public aux changements climatiques et à la prévention des catastrophes naturelles - Données scientifiques associées au suivi des changements climatiques - Gestion participative avec les communautés	- Implication et sensibilisation du public, notamment les jeunes, à l'observation des saisons et aux changements climatiques - Vaste réseau d'observateurs, réparties sur l'ensemble du territoire - Suivi des impacts des changements climatiques à l'échelle locale et nationale	- 70 cours d'eau étudiés chaque année, à travers le Québec, le Nouveau-Brunswick, l'Île-du-Prince-Édouard et le Manitoba - Réseau étendu de collaborateurs sur le territoire - Sensibilisation et implication de plus de 1 700 jeunes dans la protection et la valorisation des écosystèmes aquatiques (dont les communautés autochtones)

1.2 Intérêt et apports des sciences participatives

Il est aujourd'hui difficile pour les chercheurs d'appréhender seuls des phénomènes vastes et complexes comme les changements climatiques et l'impact de l'Homme sur l'environnement (Mathieu, 2011). La participation citoyenne est donc un élément essentiel pour la réussite de tels projets (Silvertown, 2009). La Figure 1.2 présente certains des avantages de l'utilisation des sciences participatives. L'apport des citoyens à la science et les bénéfices de leur participation, tant pour eux que pour les chercheurs, sont par la suite développés.



Figure 1.2 : Avantages des sciences participatives.

Source : Haklay, (2018)

1.2.1 Les « observ'acteurs » : contribution des citoyens à la recherche

Premièrement, les participants sont intéressés, motivés et dédiés aux projets dans lesquels ils s'impliquent, puisqu'ils le font pour leur plaisir (Cohn, 2008; Haklay, 2013). Ils ont des connaissances sur le sujet et portent également une attention particulière aux détails, même si ce ne sont pas des professionnels du domaine (Cohn, 2008). De plus, leur éducation de base en science, principalement acquise pendant leur cursus scolaire, leur permet de faire des observations avec peu d'entraînement et peu ou pas de supervision (Haklay, 2013). Il faut cependant que le matériel et les protocoles à leur disposition soient fiables et précis pour minimiser les erreurs, notamment dans la prise de données, et les orienter dans le processus (Cohn, 2008). Les participants, n'étant pas des spécialistes du domaine, peuvent néanmoins résoudre des problèmes compliqués. En effet, des amateurs jouant à un jeu d'ordinateur (Foldit) ont permis de découvrir des structures complexes, dans le cas de la prédiction de structures protéiques de virus (Khatib et al., 2011).

Deuxièmement, les "citoyens scientifiques" le font volontairement et sont donc une source de main d'œuvre et de compétences peu coûteuse. Ils représentent également une puissance de calcul grâce au *volunteered computing*, et même parfois une source de financement (Cohn, 2008; Silvertown, 2009; Mathieu, 2011). Par exemple, chaque année des milliers de personnes paient pour avoir le privilège de participer, pendant leurs vacances, à des projets de recherche sur le terrain, développés par l'organisation *Earthwatch* (Brightsmith, Stronza et Holle, 2008). Ces personnes représentent un support non négligeable pour l'acquisition de données scientifiques, notamment dans le domaine de l'écologie et des changements climatiques, qui requièrent un grand nombre d'observateurs sur une longue période de temps (Dickinson et al., 2012). En effet, leur répartition géographique et leur engouement favorisent l'observation de phénomènes dans le temps et sur de vastes territoires. Leurs observations complètent et actualisent les informations déjà existantes (Dupre et Micoud, 2007). L'obtention de résultats significatifs, en grande partie associée à la capacité à obtenir un grand nombre de données, serait bien plus coûteux et bien moins efficace s'il était réalisé entièrement par des équipes scientifiques (Mathieu, 2011; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Troisièmement, l'implication des populations locales, dans des suivis par exemple, contribue et influence les prises de décisions politiques (Aisling Irwin, 2018). Le projet *CurieuzeNeuzen* en Belgique en est un bon exemple. En effet, les résultats issus des mesures de la qualité de l'air collectées par une part importante de la population ont soulevés des questions, notamment relatives à la santé, et en ont fait un sujet central des élections locales (Aisling Irwin, 2018). En outre, les décisions prises s'implémentent et sont mises en œuvre plus rapidement lorsque les populations locales sont impliquées : 0 à 1 an contre 3 à 9 ans si les études sont conduites seulement par des scientifiques (Danielsen et al., 2010). De plus, les citoyens engagés dans les projets diffusent l'information et les connaissances acquises autour d'eux et accroissent la visibilité des recherches scientifiques (Couvét et al., 2008; Irwin, 2018). Dans cette optique, étendre le rôle des citoyens à d'autres tâches dans le processus de recherche, de la conceptualisation à la publication, pourrait être intéressant pour leur implication et les suites données aux projets (LERU, 2016).

1.2.2 Recherche collaborative gagnante pour tout le monde

Actuellement, les meilleurs projets de sciences participatives sont ceux qui profitent à la fois aux scientifiques professionnels et aux citoyens qui s'investissent pleinement dedans (Silvertown, 2009). Le projet « *Survivors* » est un bon exemple des bénéfices mutuels des sciences participatives, dans le cadre scolaire (INRA, 2016). Les élèves impliqués apprennent des notions de biologie et d'écologie, notamment sur les arbres, mais développent également d'autres compétences comme la patience et la prise de responsabilité. Les chercheurs, quant à eux, reçoivent une aide précieuse, obtiennent des résultats scientifiques et sensibilisent le jeune public aux problématiques environnementales et aux besoins des espèces arbustives (INRA, 2016). Ce type de projet permet également de faire découvrir le monde de la recherche et de valoriser les carrières scientifiques auprès des jeunes, en d'autres mots de favoriser la relève scientifique (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; INRA, 2016). Le Tableau 1.3 expose de manière plus générale les bénéfices pour les participants et les scientifiques impliqués dans des programmes de sciences participatives.

Tableau 1.3 : Bénéfices des programmes de sciences participatives pour les participants et les scientifiques impliqués

Bénéfices pour les participants volontaires	Bénéfices pour les scientifiques
Acquérir de nouvelles connaissances et compétences dans le domaine choisi mais aussi sur les processus scientifiques mis en œuvre. Pour ce faire, il reste indispensable que les chercheurs s'efforcent à vulgariser et communiquer les résultats de leurs travaux (Mathieu, 2011)	Possibilité : - D'accumuler de nombreuses données, à grande échelle - De gagner du temps si un grand nombre de contributeurs peuvent être mobilisés simultanément - De limiter les coûts, notamment ceux associés à la prise de données sur le terrain (Wilderman et al., 2004; Bonney et al., 2009; Conrad et Hilchey, 2011; Dickinson et al., 2012; Couvet et Teyssède, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016)
S'impliquer et contribuer au progrès et à l'élargissement des champs de connaissances en général (Couvet et Teyssède, 2013)	Mobiliser et impliquer les populations, localement ou à plus grande échelle (Wilderman et al., 2004; Silvertown, 2009; Conrad et Hilchey, 2011; Kobori et al., 2016)
Aider à la résolution de problématiques et de questionnements (Couvet et Teyssède, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016)	Bénéficier des savoirs, expériences et compétences des gens ainsi que des connaissances traditionnelles (Conrad et Hilchey, 2011; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016)
Participer à la diffusion et à la visibilité de la recherche et des projets (Couvet et Teyssède, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016)	Diffuser l'information et faire connaître la démarche scientifique à un large public (Conrad et Hilchey, 2011; Couvet et Teyssède, 2013; INRA, 2019)
Contribuer à l'évolution des visions du monde (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016)	Faire participer les citoyens à la production de connaissances et aux changements de mentalité et de comportements (Mamede, Benites et Alho, 2017)
Obtenir des réponses à leur préoccupations sur leur santé, leur alimentation, leur environnement, etc. (INRA, 2019)	Améliorer les rapports et les échanges entre les sciences et la société (Couvet et Teyssède, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; INRA, 2019)

En plus des citoyens et des scientifiques, d'autres organisations peuvent être impliquées dans les projets de sciences participatives. C'est le cas des associations, qui sont parfois en charge de la communication et de l'animation de programmes qui correspondent à leurs valeurs. Elles aident au recrutement des participants et des autres contributeurs et maintiennent la participation des bénévoles dans le temps (Mathieu, 2011).

1.2.3 Processus d'amélioration continue

Dans la plupart des projets de sciences participatives, tous les acteurs, tant scientifiques que citoyens, participent à l'amélioration continue des programmes en formulant notamment des commentaires et questionnements tout au long du processus (LERU, 2016). Un suivi précis et des retours permettent de faire émerger tant les points positifs que négatifs, donnant, de ce fait, la possibilité d'améliorer et d'ajuster les futurs projets (Bonney et al., 2009). L'utilisation de plus en plus grande des nouvelles technologies pour la collecte et l'analyse des données fait aussi partie de ces évolutions notables qui permettent aux sciences participatives de prendre de l'ampleur et de gagner en fiabilité (Haklay, 2013). Des outils statistiques sont notamment mis au point pour repérer et corriger les biais d'échantillonnages et les erreurs de détection, de mesure, d'identification etc. (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). L'évolution des technologies et des techniques de communication sont des avantages indéniables qui permettront de continuer à cheminer et progresser dans le domaine.

1.3 Limites et défis des sciences participatives

Les sciences participatives comportent néanmoins de nombreux défis et limites. Tout d'abord, la pluralité des termes utilisés dans le domaine des sciences participatives et les différentes conceptions de ceux-ci ne facilite pas leur diffusion et explique probablement leur sous-représentation dans la littérature scientifique (Holling, 1998; Silvertown, 2009). Cette sous-représentation nuit à la reconnaissance des sciences participatives en tant que moyen scientifique valable pour la prise de données et n'aide pas à les rendre accessibles et attractives auprès du public. De plus, ces projets, par la participation de multiples personnes, possèdent un niveau d'incertitude relatif à la qualité des données plus grand. Or, la qualité des données est un point clé en science et devient donc une priorité dans les programmes de sciences participatives (Lukyanenko et al., 2019). Comme les projets de sciences participatives s'intègrent plus difficilement dans le cadre scientifique habituel, ils se retrouvent bien souvent dans la "littérature grise" ou ne sont pas publiés (Haklay, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Un des principaux défis des sciences participatives est donc de parvenir à réduire au maximum l'incertitude et de faire valoir cette approche comme une méthode de collecte de données scientifiques valable (Haklay, 2013).

1.3.1 Bénévoles « amateurs »

Les sciences participatives sont généralement confrontées à des défis techniques, notamment au niveau de la maîtrise de la technologie, ainsi qu'à des défis associés à la qualité et à l'évaluation des données (Dai et al., 2018; Lukyanenko et al., 2019). En effet, la qualité des données est essentielle en science, et l'implication de « non scientifiques » dans les projets entraîne un biais lors de la prise de données qui a des répercussions sur l'analyse et l'interprétation de celles-ci (Gosselin, Gosselin et Julliard, 2010; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Par exemple, le projet d'observation des espèces de papillons de l'Observatoire des papillons de jardins (OPJ) se base sur les observations des jardiniers pour faire des études et comparaisons synchroniques, c'est-à-dire à un moment spécifique (Gosselin et al., 2010). En raison du biais d'identification relativement important, associé à la pratique des jardiniers et à leurs connaissances, il est difficile de faire des études et comparaisons temporelles (Gosselin et al., 2010). Ce biais associé à l'observation peut donc être un frein important et limiter les recherches faites avec les données récoltées (Gosselin et al., 2010).

La qualité des données varie principalement avec le nombre de participants et leur connaissance du sujet (Haklay, 2013). La vérification et la validation des données en aval de leur collecte est ainsi une étape cruciale (Dupre et Micoud, 2007; Silvertown, 2009). Pour limiter le biais, la standardisation des méthodes de collectes de données et le suivi d'un procédé scientifique rigoureux sont aussi indispensables (Silvertown, 2009; Couvet et Teyssèdre, 2013). Les programmes de sciences participatives, tels que l'Observatoire des saisons (ODS) (Tela Botanica, 2019), le *Christmas Bird Count* (Silvertown, 2009) et Mission Monarque (Insectarium de Montréal, 2019a), ont tous des protocoles à la fois précis et faciles à suivre afin que les participants soient accompagnés et guidés tout au long des observations et de la prise de données. En plus de la qualité des données récoltées, il existe des craintes au niveau de l'implication des chercheurs : « manipulation de la recherche », « biais en faveur d'un consensus mou et du court terme », « dévalorisation de la recherche fondamentale », « politisation », « risque de lobbying », « pseudo-science », etc. (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Ces inquiétudes s'ajoutent au fait que les sciences participatives sont développées par certains organismes scientifiques comme un « outil de communication institutionnelle » et non un mécanisme de recherche à proprement parler (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Un deuxième élément à prendre en compte est la participation bénévole des citoyens. Ceci implique qu'ils peuvent s'engager dans un ou plusieurs projets, se retirer quand ils le souhaitent et s'investir plus ou moins selon leur intérêt et leurs disponibilités (Gosselin et al., 2010; Julliard, 2017). Par exemple, certaines personnes souhaitent contribuer à la recherche sans pour autant comprendre en détail les mécanismes associés et décident simplement de donner de leur "temps d'ordinateur" à certains projets comme climateprediction.net (Haklay, 2013; University of Oxford et al., 2019). D'autres vont au contraire chercher à apprendre, comprendre et améliorer le projet. Au fur et à mesure de leurs découvertes, ils vont demander des informations, des retours et des explications, en plus d'émettre des suggestions et de nouveaux questionnements (Silvertown, 2009; Haklay, 2013). Leur motivation dans le temps n'est pas non plus constante et un roulement des participants est fréquent dans les projets (Gosselin et al., 2010). Pour les participants, il existe également des risques, même s'ils sont relativement faibles : déception et démotivation suite à des attentes trop grandes, problèmes liés à la propriété et à la valorisation des résultats ou encore l'exploitation et l'instrumentalisation des personnes (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). La reconnaissance des participants et de tous les acteurs en général est donc nécessaire (Dickinson et al., 2012). Elle peut prendre différentes formes allant de la citation de leur nom à la diffusion et redistribution des données et résultats (Dupre et Micoud, 2007).

1.3.2 Mobilisation des acteurs

Pour que les projets de sciences participatives soient un succès il faut un nombre suffisant de personnes impliquées, tant au niveau des scientifiques que des citoyens, et un engouement perdurant dans le temps (Silvertown, 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kobori et al., 2016). Or, le recrutement de participants n'est pas évident et le public doit être ciblé attentivement pour permettre l'adhésion des personnes intéressés et le maintien de leur contribution dans le temps (Kobori et al., 2016). Le meilleur exemple est le Christmas Bird Count qui date des années 1900 et perdure encore sous différentes formes tels que Wiki Aves (WikiAves, 2019) ou le Big Day (The Cornell Lab of Ornithology, 2019). Ce projet compte encore aujourd'hui de nombreux adeptes, ornithologues amateurs et professionnels, et suit un protocole spécifique et rigoureux qui permet d'avoir une accumulation de données intéressante pour la recherche (Silvertown, 2009). Mais les scientifiques et les citoyens ne sont pas les seuls investis dans ces projets. Les associations et

institutions, qui peuvent être à la base de projets de sciences participatives ou y contribuer de manière significative, notamment pour l'animation des programmes dans le temps, ne doivent pas être négligées. La *North American Butterfly Association* (Association nord-américaine des papillons en français) est un bon exemple. Elle est à l'origine d'un programme de science participative pour le décompte de différentes espèces de papillons en Amérique du Nord. Depuis 1993, elle publie des rapports annuels comprenant des informations sur la répartition géographique et la taille des populations des espèces observées par les participants. Elle diffuse également à ses membres un magazine, le *American Butterflies*, et rend accessible une liste répertoriant plus de 700 espèces de papillons recensés en Amérique du Nord grâce à son programme (NABA, 2017).

La réussite des programmes de sciences participatives est donc en grande partie associée à la bonne entente et à la collaboration de tous les acteurs (Mathieu, 2011). Parvenir à mobiliser dans la durée ces parties prenantes aux logiques, valeurs et cadres d'action différents est un enjeu de taille (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Julliard, 2017; Dai et al., 2018). Par exemple, maintenir l'enthousiasme et l'implication des participants à long terme est un réel défi (Gosselin et al., 2010; Dickinson et al., 2012). Il faut ainsi arriver à allier les intérêts de toutes les parties prenantes (Alan Irwin, 1995) tout en joignant les connaissances scientifiques aux savoirs locaux (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). De ce fait certains sujets ou suivis, comme les oiseaux ou les papillons, sont plus populaires que d'autres (Gosselin et al., 2010), dû à l'intérêt pour le sujet ainsi qu'à la capacité de fédérer les acteurs autour du projet.

1.3.3 Le temps, l'organisation et l'argent

Le temps est une notion importante dans les projets de sciences participatives. D'une part, les citoyens souhaitent s'impliquer et être informés tout au long des projets qui les intéressent. La discussion avec le public est donc essentielle et doit avoir lieu en amont de la phase finale des recherches (Alan Irwin, 1995). Une bonne communication permet une prise de décision qui reflète les intérêts de toutes les parties prenantes mais demande un investissement en temps et en énergie (Alan Irwin, 1995). Les participants souhaitent aussi être avisés rapidement des résultats. Cependant, la publication rapide de résultats et le travail de vulgarisation ne sont pas toujours

compatible avec le calendrier des chercheurs et de leurs étudiants (Mathieu, 2011; Delgado et Åm, 2018). Ainsi, le temps est un élément qui structure la recherche (Delgado et Åm, 2018) et dont il faut tenir compte lors de la mise en place et la réalisation de programmes de sciences participatives.

L'organisation est un autre élément déterminant dans la réussite des projets de sciences participatives. En effet, les nombreux participants, partenaires et chercheurs qui se côtoient doivent travailler de concert (Silvertown, 2009). Il faut réussir à traiter des demandes et des données hétérogènes liées au nombre important de participants et à allier la rigueur scientifique aux demandes des différents acteurs (Alan Irwin, 1995; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Cette étape nécessite au minimum une standardisation des processus quant à la prise de données et une cyber-infrastructure pour leur collecte (Silvertown, 2009). Selon la taille des programmes, il peut aussi être préférable d'avoir un personnel dédié au développement, à la gestion, au suivi du projet et à la coordination des différents acteurs du programme (Bonney et al., 2009). Tous ces éléments ont une répercussion sur le budget alloué.

Un investissement financier est nécessaire tout au long du projet (Bonney et al., 2009). En effet, même si les participants bénévoles ne sont pas rémunérés, les autres acteurs doivent l'être, notamment les professionnels du milieu associatif qui s'occupent de l'animation et du suivi ou encore les techniciens qui travaillent à la mise à disposition des données récoltées (Dupre et Micoud, 2007; Mathieu, 2011). Par exemple, le programme de science participative OPAL (Open Air Laboratories) a nécessité un financement de 12 millions de livres sterling sur cinq ans (Silvertown, 2009), ce qui correspond à une subvention de plus de 21 millions de dollars canadiens. La tâche de recherche de financement de projets de sciences participatives est parfois plus complexe que celle de projets de recherches traditionnels et incombe fréquemment aux associations chargées de l'animation, limitées en termes de temps, de moyens et de capacités (Mathieu, 2011).

1.4 Pistes d'améliorations pour les sciences participatives

Les sections qui précèdent permettent d'avoir un point de vue général de l'état actuel de cette part des sciences peu conventionnelle que constitue les sciences participatives. Des améliorations

restent cependant nécessaires pour rendre les programmes de science participative plus connus du public et reconnus scientifiquement. Conrad et Hilchey, (2011) ont analysé les enjeux et les opportunités de développement des sciences participatives. Pour ces auteurs deux points d'amélioration demeurent. Premièrement, il est nécessaire d'analyser et de comparer le succès des différents programmes mis en place, en identifiant les facteurs clés de réussite ou d'échec, afin d'améliorer les projets existants et de faciliter l'élaboration des nouveaux programmes. Deuxièmement, un effort doit être fait pour répertorier et comparer une plus grande quantité d'études de cas expliquant comment les décideurs utilisent les données. Ces études auraient aussi pour finalité de mettre en avant les difficultés rencontrées au cours des projets, toujours dans l'optique d'amélioration continue des programmes de sciences participatives. Le Tableau 1.4 présente également différents critères de réussite (Dickinson et al., 2012; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kobori et al., 2016; LERU, 2016), déjà mis en place dans certains projets.

Tableau 1.4 : Critères de réussite des programmes de sciences participatives et exemples de projets les appliquant déjà

Critères de réussite (Dickinson et al., 2012; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kobori et al., 2016; LERU, 2016)	Exemples de projets
Avoir une approche scientifique rigoureuse avec des objectifs et des protocoles clairs et précis.	<i>Christmas Bird Count</i> : les protocoles utilisés depuis 1900 ont permis la collecte de données fiables et ayant une grande valeur scientifique (Silvertown, 2009)
Adopter des normes scientifiques, notamment le libre accès aux publications et aux données, des logiciels à code source ouvert et une transparence totale des méthodes de recherche.	Aucun projet ne donne actuellement accès à la totalité des données mais la grande majorité des projets expliquent bien les méthodes de recherche et les articles en lien avec les programmes sont disponibles et valorisés.
Investir du temps et de l'argent dans la sensibilisation et la gestion de la communauté dès le début du projet, afin de garantir un nombre suffisant et une certaine diversité des participants.	La majorité des programmes de sciences participatives considérés comme une réussite actuellement prennent en compte ces points. Cependant, il semble important de toujours les garder en mémoire et rester créatif et innovant pour assurer et maintenir la participation et le soutien des partenaires.
Mettre en place une gestion efficace des ressources, qu'elles soient humaines, matérielles ou financières, avec par exemple la recherche de nouveaux modes de financement et la mise en place d'outils d'animation, de médiation et de formation.	
Mettre en place une gouvernance et une organisation adéquate avec des rôles définis pour les différents acteurs, la répartition claire des tâches et des bénéfices, l'implication de tous dans le processus et une communication structurée.	Les projets de <i>Cemaden Educação</i> comprennent tous des directives claires, des explications détaillées, des exercices pratiques et des documents précis qui permettent à tous les acteurs de bien connaître leur rôle et leurs tâches (Cemaden, 2019b, 2019a)

Tableau 1.4 : Critères de réussite des programmes de sciences participatives et exemples de projets les appliquant déjà (Suite)

Critères de réussite (Dickinson et al., 2012; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Kobori et al., 2016; LERU, 2016)	Exemples de projets
Garantir le respect et la reconnaissance mutuels des différents acteurs au regard des savoirs, des compétences, des décisions et des publications.	Cet aspect reste encore peu développé. La majorité du temps, les scientifiques impliqués dans les projets sont nommés dans les articles publiés et la participation des citoyens est valorisée sur les sites internet associés aux programmes.
Maintenir la motivation tout au long du projet en s'adaptant aux attentes, à la disponibilité, à l'intérêt et à l'implication des acteurs. Les démarches pédagogiques innovantes et ludiques et les nouvelles technologies sont des outils à favoriser.	<u>Foldit</u> : l'utilisation d'un jeu sur ordinateur a permis de mobiliser de nombreuses personnes et représente un défi attrayant et motivant (Aliaga, Durocher et Johnson, 2019) <u>Galaxy Zoo</u> : la classification de galaxies grâce à des images provenant de télescopes a attiré plus de 150 000 personnes à son lancement en 2007 et reste encore avec plus de 30 000 volontaires actifs à ce jour (Zooniverse, 2019)
Concevoir les projets pour encourager tous les participants à apporter leur contribution et à développer leurs compétences et leur créativité.	
Encourager le développement des sciences participatives en milieu scolaire tout en tenant compte des spécificités qui y sont associées.	<u>Survivors</u> , <u>Vigie-Nature École</u> et <u>Mass experiment</u> : ces trois types de projets impliquent des élèves dans la recherche et montrent des résultats concluants tant pour la science qu'au niveau éducatif (REPERE, 2016; Muséum national d'Histoire naturelle et al., 2019; Vetenskap et Allmänhet, 2019)

Finalement, il faut également continuer à rendre accessible et faire connaître et reconnaître les sciences participatives. Les personnes souhaitant participer devraient trouver des plateformes simples d'accès et d'utilisation qui les guident, les encouragent et les accompagnent (LERU, 2016). Dans l'idéal les sciences participatives rendraient ainsi la science plus efficace, transparente et attractive (Dai et al., 2018).

Pour conclure, les sciences participatives, aujourd'hui en plein essor, semblent un levier d'action puissant face aux sciences traditionnelles, alliant une conscientisation des citoyens, un plus large échantillon de données, un gain de temps dans la récolte des informations, une main d'œuvre moins onéreuse mais également une accessibilité possible pour un plus grand nombre. Ce chapitre a introduit les avantages et les limites des programmes de sciences participatives et a exposé les critères de réussite de ces programmes. Ces informations, alliées au contexte social et écologique de la Caatinga, sont essentielles au développement d'un programme pour le suivi des changements climatiques.

Chapitre 2

La Caatinga dans le contexte des changements climatiques

Parmi les six biomes présents au Brésil (Figure 2.1), la Caatinga, située au Nord-Est, est celui le plus sec. Cette forêt tropicale saisonnière sèche couvre plus de 800 000 km², soit environ 10% du territoire brésilien (IBGE, 2004b; Santos et al., 2011). Son nom, Caatinga qui signifie « forêt blanche » en Tupi-Guarani (Leal et al., 2003; Cavalcante et Major, 2006), lui vient de son aspect atypique lors de la saison sèche : lorsque les arbres perdent en grande majorité leurs feuilles, ils laissent place à un paysage pâle et brillant (Leal et al., 2005). Ce biome couvre neuf États, soit Bahia, Sergipe, Alagoas, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí, Minas Gerais et Pernambuco (Drumond et al., 2000). Le chapitre 2 présente la Caatinga dans le contexte actuel des changements climatiques. Cet état des lieux pointe les principales problématiques pouvant limiter les transformations et les adaptations face à ces changements. Cela permet également de faire ressortir le manque de connaissances et d'informations existantes et exploitables scientifiquement pour effectuer un suivi adéquat des changements climatiques et de leurs impacts dans ce biome.



Figure 2.1 : Carte des biomes du Brésil.

Source : Senderlei, (2015)

2.1 La Caatinga : biome singulier du Brésil

Dans les prochaines sections, une analyse du contexte politique, économique, socioculturel, écologique et légal est faite pour présenter la Caatinga dans le contexte des changements climatiques. Elle permet d'avoir une vision d'ensemble des différents éléments pouvant influencer le développement d'un programme de sciences participatives dans ce biome.

2.1.1 Dimension écologique

La Caatinga possède des caractéristiques écologiques propres qui la distinguent des autres biomes du Brésil et la rendent vulnérable aux changements climatiques. Elle présente un climat semi-aride, classé BSh selon la terminologie de Köppen-Geiger (Annexe 1) (Leal et al., 2003; Araujo et al., 2004; INPE, 2017). Cette classification, datant des années 1900 (dernière version de Köppen faite en 1936), catégorise les différents climats en fonction des précipitations et des températures (Belda et al., 2014). Selon cette classification, la Caatinga se retrouve dans la catégorie des climats secs et chauds, ayant une évapotranspiration annuelle supérieure aux précipitations annuelles et une température moyenne annuelle supérieure à 18°C (Belda et al., 2014). En effet, les températures annuelles moyennes de ce biome sont comprises entre 26 et 28°C, les niveaux de rayonnement solaire sont élevés et l'évaporation (200 mm/an) ainsi que l'évapotranspiration potentielle sont importantes (Schnell, 1966; Leal et al., 2003; Araujo et al., 2004). Les précipitations annuelles pour la Caatinga varient entre 240 et 900 mm par an, avec une moyenne de 620 mm par an pour le biome (Bellefontaine et al., 1997; Santos et al., 2011). De plus, l'indice d'aridité (IA) de la Caatinga varie entre 0,17 et 0,65 avec une moyenne de 0,43 (Houérou, 2006), qui correspond aux zones semi-arides ($0,20 < IA < 0,50$) et arides ($0,05 < IA < 0,20$) dans la classification du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) (UNEP, 1992). Cet indice est le rapport entre la moyenne annuelle des précipitations et l'évapotranspiration potentielle (UNEP, 1992). En comparaison, les zones désertiques, considérées comme hyperarides ont un indice d'aridité inférieur à 0,05 (UNEP, 1992). La Caatinga est aussi sujet à des épisodes de sécheresses sévères et prolongés (Leal et al., 2003), comme en 1777, 1877, 1973, 1983 et 1998 (Marengo, 2008). A l'inverse, des pluies intenses et des inondations sont également répertoriées (Leal et al., 2003), comme celles de 2004 ayant causé de nombreuses pertes humaines et matérielles (Marengo, 2008).

Une autre caractéristique climatique singulière de la Caatinga est la variabilité interannuelle du climat de la région, avec l’alternance marquée de la saison sèche et de la saison des pluies (Leal et al., 2003; Silva et al., 2017). La Figure 2.2 témoigne des différences paysagères observées entre ces deux saisons et les diagrammes climatiques (Figure 2.3) viennent renforcer cette distinction.



Figure 2.2 : Différences paysagères entre la saison des pluies (à gauche) et la saison sèche (à droite) dans la Caatinga.

Source des photos : Tatiane Menezes, (2018)

Les diagrammes climatiques (Figure 2.3) montrent la forte saisonnalité des précipitations dans la Caatinga, avec 85% à 90% des précipitations se produisant pendant la saison des pluies (Leal et al., 2003; Araújo et al., 2007; Silva et al., 2017). Dans certaines régions de la Caatinga, comme à Petrolândia, Bom Jesus da Lapa, Macau et Campos Sales, un à quatre mois sans précipitations ou presque sont aussi fréquents (Marengo, 2008). Ce climat, notamment les périodes prolongées de déficit hydrique, rend la Caatinga susceptible à la sécheresse et à la désertification (Leal et al., 2003; Marengo, 2008; Spinoni et al., 2015). Les diagrammes mettent également en avant l’hétérogénéité spatiale du climat la Caatinga. En effet, bien que l’on considère ce biome comme un ensemble climatique, il existe en réalité plusieurs types de Caatinga (Schnell, 1966; Leal et al., 2003; Silva et al., 2017). Une combinaison de différents facteurs, notamment la géomorphologie et l’altimétrie (Figure 2.4) ainsi que la répartition des précipitations (Figure 2.5) expliquent ces différences et permettent de faire ressortir neuf écorégions (Figure 2.6) (Leal et al., 2003; Silva et al., 2017). Cette hétérogénéité est importante à prendre en compte afin de mettre en place un programme de science participative inclusif et adapté.

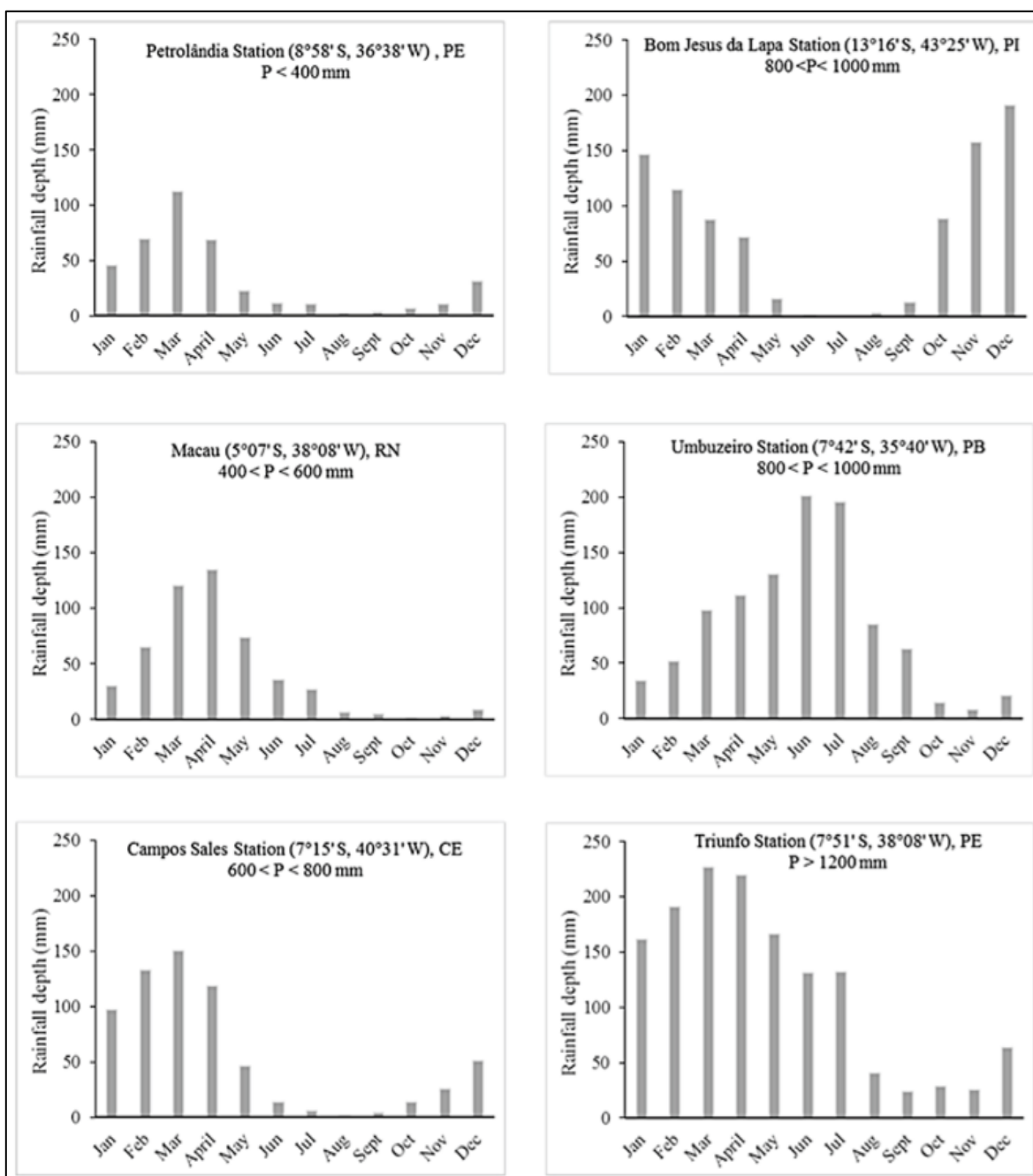


Figure 2.3 : Séries historiques de pluviométrie totale mensuelle de six stations météorologiques de la Caatinga. Le nom de la station, les coordonnées géographiques, l'État dans lequel se situe la station et la pluviométrie annuelle moyenne sont mentionnés sur chaque graphique.

Source : Silva et al., (2017)

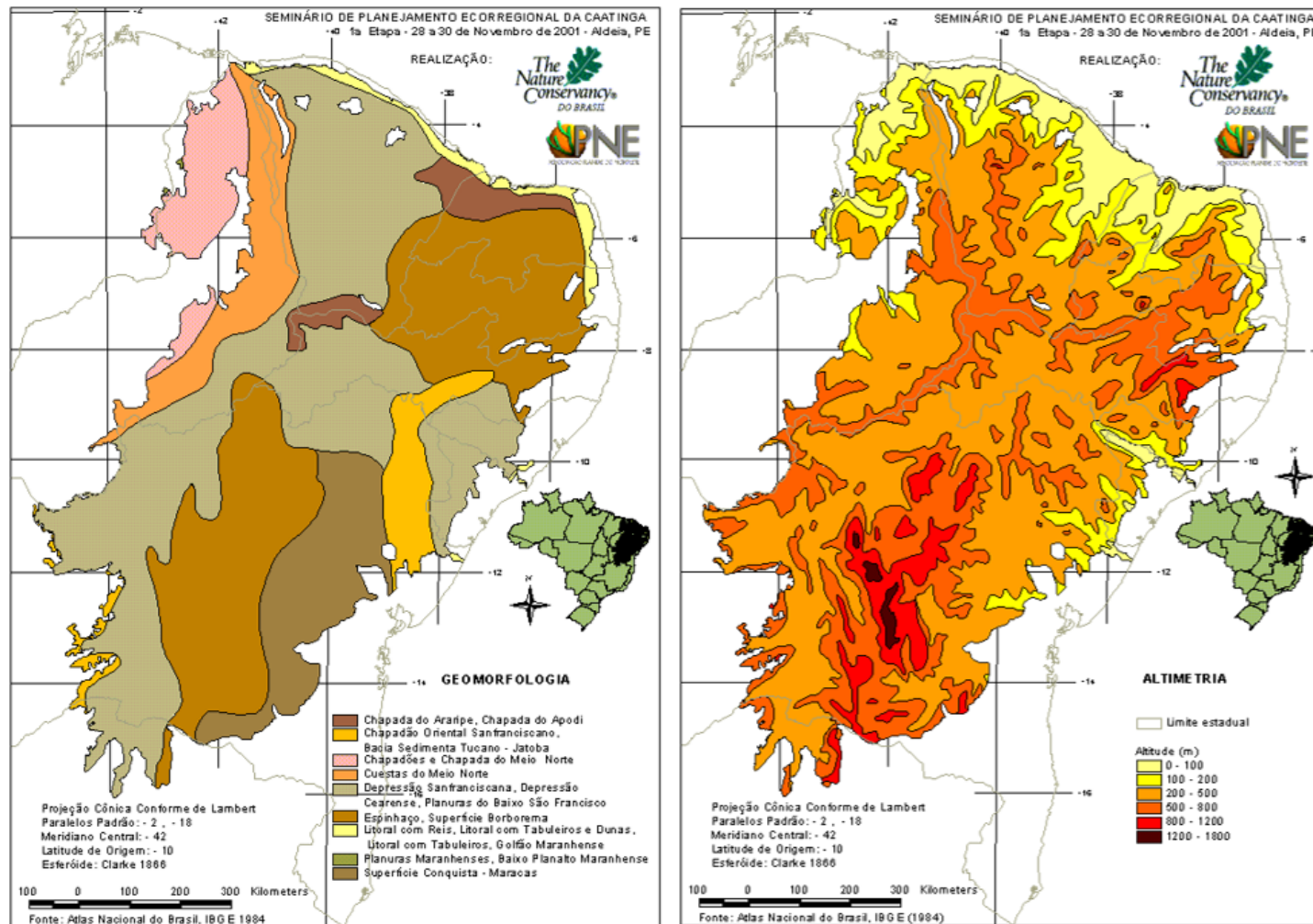


Figure 2.4 : Cartes de la géomorphologie et de l'altimétrie de la Caatinga.

Source : The Nature Conservancy do Brasil et PNE, (2001)

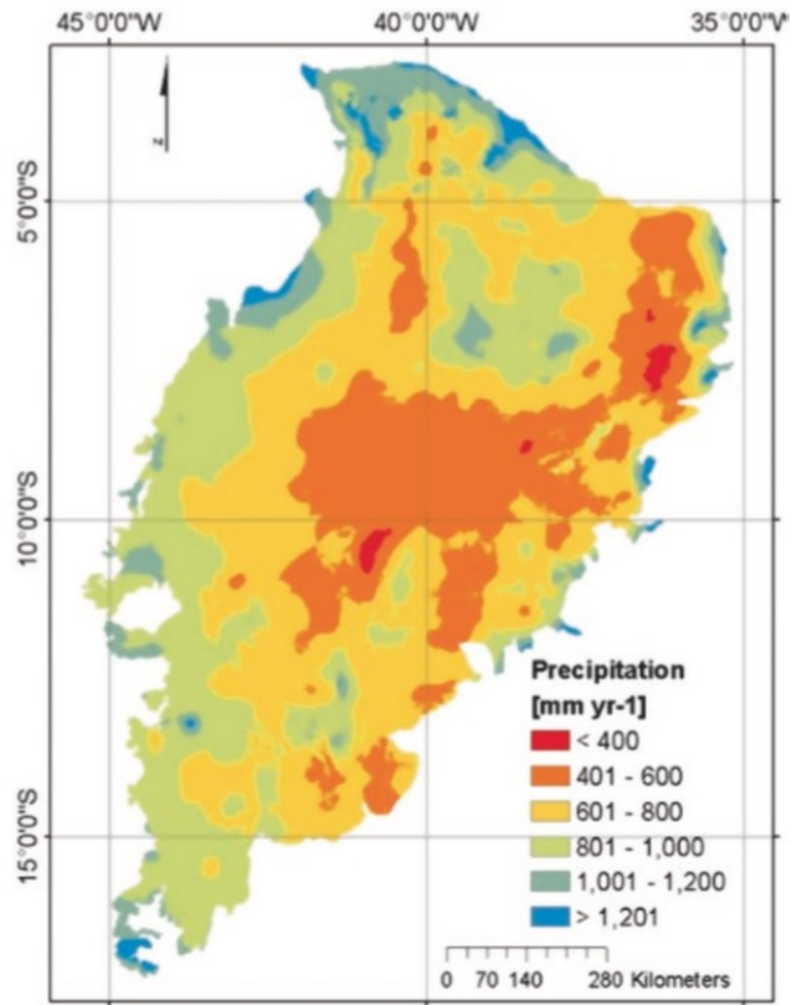


Figure 2.5 : Carte des isohyètes dans la Caatinga.

Source : Silva et al., (2017)

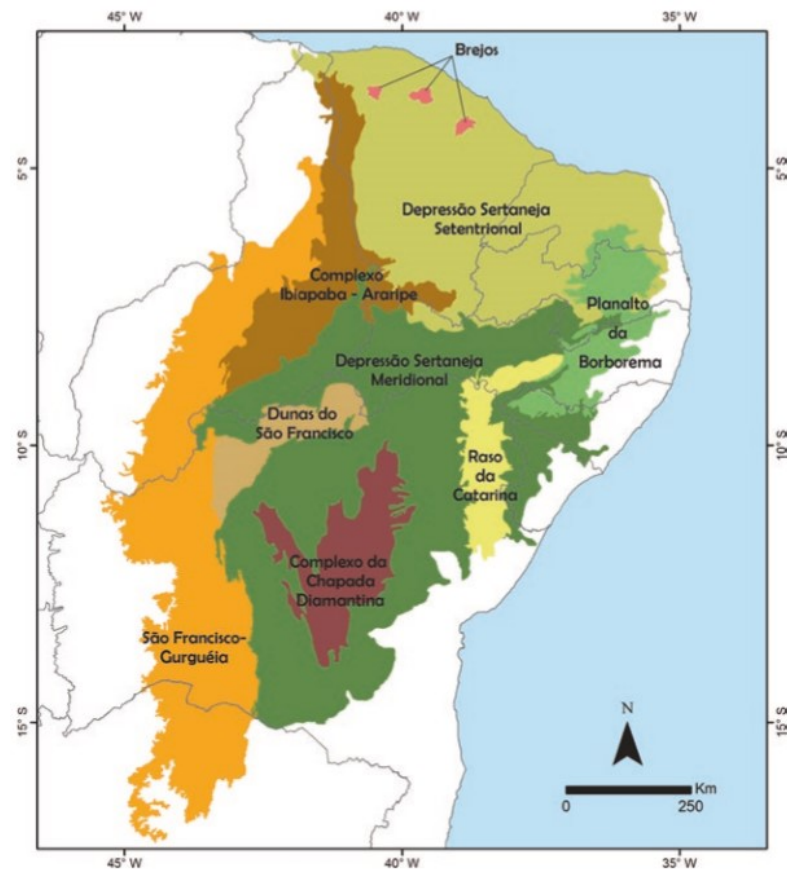


Figure 2.6 : Écorégions de la Caatinga.

Source : Silva et al., (2017)

La Caatinga est parcourue par des cours d'eau qui confèrent aux zones riveraines un microclimat particulier favorisant la croissance de forêts galerie et la présence d'une grande diversité d'organismes (Leal et al., 2003; Maruani et Amit-Cohen, 2009). La majorité des cours d'eau sont intermittents, c'est-à-dire qu'ils coulent seulement une partie de l'année, pendant la saison des pluies (Leal et al., 2003; Silva et al., 2017). Ces milieux sont importants pour la Caatinga car ils procurent de nombreux services écosystémiques (Piégay, Pautou et Ruffinoni, 2003; Holanda et al., 2005) et sont des écosystèmes très productifs et riches en biodiversité (Piégay et al., 2003; Araújo, 2009; Silva et al., 2017). Les cours d'eau permanents, dont la plupart prennent source hors de la Caatinga, permettent quant à eux un approvisionnement en eau à l'année, autant pour la faune et la flore que pour les populations humaines restant sur le territoire (Giulietti et al., 2004). L'eau étant un facteur limitant dans la Caatinga, les cours d'eau sont donc essentiels et de ce fait souvent exploités (Giulietti et al., 2004).

La végétation de la Caatinga est intrinsèquement liée aux variations climatiques que l'on y retrouve. En raison du stress hydrique important pendant une grande partie de l'année, les espèces sont principalement xérophiles avec une prédominance de plantes et d'arbres décidus, à aiguilles ou à feuilles succulentes (Schnell, 1966; Leal et al., 2003; Giulietti et al., 2004; Leal et al., 2005; Araújo et al., 2007). La distribution des précipitations influence largement la production des feuilles, des fleurs et des fruits, ainsi que les périodes de germination des graines et de croissance des plantes (Araújo et al., 2007; Souza, 2016; Rito et al., 2017; Aragão et al., 2019). Les plantes ont généralement une grande amplitude écologique, avec cependant des différences morphologiques et de croissance notables en fonction des écorégions (Jambes, 1990; Souza et al., 2018). Les espèces ayant une importante plasticité phénotypique ont une plus grande répartition sur le territoire et sont sensiblement plus résistantes aux changements climatiques (Souza et al., 2018).

La Caatinga présente également un taux d'endémisme élevé, notamment au niveau des poissons (52,9%) et des espèces végétales (Leal et al., 2003; Giulietti et al., 2004; Leal et al., 2005; Cavalcante et Major, 2006; Silva et al., 2017) avec, à titre d'exemple, 1 102 espèces d'arbres et d'arbustes dont 318 espèces endémiques actuellement répertoriées (Araújo, 2009). Ces caractéristiques rendent ce biome intéressant à préserver et protéger. Cette biomasse végétale est aussi importante dans la

lutte contre les changements climatiques. En effet, une forêt tropicale sèche, comme toutes les forêts existantes, agit principalement comme un puit de carbone pendant la saison des pluies, qui est aussi la saison de croissance des végétaux, et permet de stocker, après trente ans de régénération, 27,19 tonnes de carbone par hectare (Pereira Júnior et al., 2016). La majorité du carbone, soit 70,87%, est stocké principalement dans la biomasse ligneuse (Pereira Júnior et al., 2016; Silva et al., 2017). Les arbres et arbustes jouent donc un rôle non négligeable dans la captation et la séquestration du CO₂ atmosphérique (Pereira Júnior et al., 2016).

2.1.2 Dimension socioculturelle

La population de la Caatinga est, à l'origine, issue d'un métissage entre les peuples indigènes et les colons portugais venus s'implanter dans les années 1600. La culture et les traditions viennent en grande partie de ce mélange et un lien étroit existe entre la nature et la population (Silva et al., 2017). L'élevage et l'agriculture de subsistance étaient la base du fonctionnement et restent encore aujourd'hui les principales activités de la population rurale (Souza Nascimento, 2001; Silva et al., 2017). L'arrivée des européens et des esclaves africains au 16^{ème} siècle a entraîné des modifications sociales et l'émergence de la « *cultura sertaneja* », une culture rurale façonnée et adaptée aux conditions semi-arides de la Caatinga (Silva et al., 2017). Par exemple, les migrations saisonnières de la population, plus importantes les années de sécheresses intenses, font partie de l'histoire de la région (Silva et al., 2017). Elles démontrent les conditions difficiles de vie dans ce milieu et les limitations existantes pour le développement de l'agriculture et de l'élevage (Silva et al., 2017). La relation étroite de l'homme avec son environnement se retrouvent dans la musique, la poésie, la littérature et l'artisanat. Le thème de la nature a une signification spirituelle importante et reste une source d'inspiration et de développement culturel et social (Silva et al., 2017).

Actuellement, 28.6 millions de personnes vivent dans la Caatinga, soit environ 13% de la population du Brésil (Silva et al., 2017; IBGE, 2019). Cette région, qui compte environ 20 à 30 habitants par km², fait partie des forêts tropicales sèches particulièrement peuplées (Gariglio, Sá Barretto Sampaio, Antônio Cestaro et Yoshio Kageyama, 2010). Malgré l'exode rural et l'urbanisation grandissante observés depuis les années 1970 (Gariglio et al., 2010), 9.5 millions d'habitants, c'est-à-dire un tiers de la population de la région, vivent dans de petits villages ruraux (Silva et al., 2017). Le taux de

pauvreté est particulièrement élevé et les indicateurs sociaux sont bas dans ces zones rurales (Leal et al., 2005; Marengo, 2008; IBGE, 2019). Le climat semi-aride augmente la vulnérabilité des populations (Marengo, 2008) et les sécheresses et les inondations ont un impact négatif direct sur les habitants qui dépendent des ressources naturelles de la région (Leal et al., 2005; Marengo, 2008). Les espèces végétales sont utilisées de diverses manières, notamment comme source de nourriture et de fourrage pour les animaux ou à des fins médicinales et ornementales (Drumond et al., 2000; Giulietti et al., 2004; Araújo et al., 2007; Albuquerque et al., 2008; Lucena et al., 2008). La vente de ressources naturelles, comme le bois à des fins de construction ou de chauffage, est une source de revenu complémentaire à celles de l'agriculture et de l'élevage (Jambes, 1990; Souza Nascimento, 2001). La population rurale est fortement dépendante des ressources disponibles pour survivre et leur exploitation n'est pas pensée de manière durable (Jambes, 1990; Araújo et al., 2007; Silva et al., 2017). Ainsi, la coupe d'arbres, l'agriculture, l'élevage et la chasse sont toutes des activités ayant des impacts néfastes sur les écosystèmes, les sols et la biodiversité (Drumond et al., 2000; Leal et al., 2005). Cette pression sur l'environnement crée un cercle vicieux de dégradation du milieu et de pauvreté humaine, les ressources disponibles ne permettant plus de soutenir les populations vivant sur le territoire (Silva et al., 2017).

2.1.3 Enjeux environnementaux de la Caatinga

Les habitants de la Caatinga, qu'ils soient citadins ou ruraux, dépendent des ressources qu'elle offre et les activités anthropiques sont bien souvent en conflit avec la préservation de l'environnement (Salvatierra et al., 2017; Silva et al., 2017). De manière générale, les forêts tropicales sèches présentent une perte de couvert forestier importante due aux activités humaines. En effet, Powers et al. (2011), souligne que plus de 75% des activités de conversion ou d'utilisation des terres tropicales ont eu lieu dans les régions les plus sèches au cours du dernier siècle. Concernant la Caatinga, environ 46% de la superficie totale a été déboisée et 16 576 km² de végétation indigène perdue entre 2002 et 2008 (Ministério do Meio Ambiente, 2010). La coupe et la récolte de bois, ainsi que les changements d'utilisation des terres, comme la conversion pour l'agriculture et l'élevage, sont des causes importantes de la diminution de la couverture forestière (Jambes, 1990; Silva, 2002; FAO, 2016) et accélèrent le processus de désertification dans la région (Leal et al., 2003; Leal et al., 2005; Vieira et al., 2013).

Les activités de production alimentaire, telles que l'agriculture et l'élevage, ont d'autres impacts négatifs sur l'écosystème, notamment au niveau de la qualité des sols (Leal et al., 2003) et de la biodiversité (Leal et al., 2005; Oliveira et al., 2012; Almeida-Cortez et al., 2016a; Schulz et al., 2018). En effet, l'irrigation associée aux cultures engendrent la salinisation des sols, qui augmente à son tour le taux d'évaporation de l'eau contenue dans ceux-ci et diminue leur productivité à long terme (Leal et al., 2003). Les zones avec une pression importante de broutage montrent quant à elles une plus faible richesse d'espèces de plantes que les zones avec peu ou pas de pression liée à l'élevage (Almeida-Cortez et al., 2016a). Le broutage affecte aussi négativement le recrutement des espèces arborescentes plus rares (Schulz et al., 2018). Or, la nécessité de production alimentaire reste une préoccupation majeure dans cette partie du Brésil relativement pauvre et les aires d'agriculture et de pâturages ont augmenté considérablement depuis les années 1990 (Vieira et al., 2013).

De nombreuses espèces de plantes sont également utilisées par les communautés locales à des fins multiples, comme pour l'alimentation, le fourrage, une utilisation médicinale, la construction, ou encore comme combustible (Albuquerque et al., 2008; Lucena et al., 2008). Plus elles sont polyvalentes, plus elles sont exploitées (Albuquerque et al., 2008). Ce besoin entraîne une pression plus importante sur la ressource et a un impact direct sur la conservation des espèces (Souza Nascimento, 2001; Ricardo, 2008) et la gestion des ressources au niveau local (Albuquerque et al., 2008). La coupe de bois a aussi un impact négatif sur les services écosystémiques tels que la conservation des sols et de la ressource hydrique et le stockage du carbone atmosphérique (Althoff et al., 2016). Or, la végétation indigène est plus résistante à la sécheresse lorsqu'elle n'est pas soumise à la pression anthropique, comme par exemple dans les zones strictement protégées (Salvatierra et al., 2017). De plus, l'aridité et les activités anthropiques interagissent de manière complexe et ont un impact négatif significatif sur la biodiversité (Arnan, Arcoverde, Pie, Ribeiro-Neto et Leal, 2018). La préservation de l'environnement a donc un intérêt particulier pour limiter les effets des changements climatiques (Salvatierra et al., 2017).

L'introduction et la propagation d'espèces exotiques vient ajouter une pression sur l'écosystème (Cavalcante et Major, 2006). Ces plantes sont principalement utilisées pour la nourriture, la médecine et à des fins ornementales (Albuquerque, 2006; Cavalcante et Major, 2006). Elles ont souvent été implantées pour pallier un manque que les espèces indigènes ne pouvaient combler (Albuquerque, 2006). Certaines ont même été plantées, au départ, pour des questions environnementales (Cavalcante et Major, 2006). Par exemple, *Prosopis juliflora* a notamment été introduite pour des questions de reforestation (Cavalcante et Major, 2006) et elle est actuellement considérée comme une menace majeure pour les espèces indigènes de la Caatinga (Souza Nascimento et al., 2014).

Les routes qui fragmentent le territoire viennent altérer et fragiliser les écosystèmes naturels avec des conséquences négatives notamment au niveau de la propagation des espèces envahissantes et des feux (Leal et al., 2003). La Figure 2.7 présente trois facteurs ayant un impact important au niveau de la Caatinga : le feu, les routes et la déforestation. L'impact anthropique total de ces trois facteurs met en évidence l'influence de l'homme sur l'environnement avec 63,3% de la Caatinga perturbée par les activités anthropiques en 2010 (Silva et al., 2017). Or, les écosystèmes non perturbés sont plus résilients aux changements climatiques que ceux altérés par l'homme (Silva et al., 2017).

Dans l'environnement aride de la Caatinga, la présence des cours d'eau est une opportunité et une ressource précieuse pour le développement des communautés humaines (Araújo, 2009; Souza, 2016; Silva et al., 2017). Les milieux riverains, très productifs et intéressants pour l'irrigation, sont souvent utilisés pour la culture intensive et le pâturage (Araújo, 2009). S'ajoute à cela la création de barrages. La raison principale de leur construction est la pérennisation des cours d'eau intermittents pour faciliter l'accès à l'eau pour la population et la canalisation des cours d'eau permanents pour contrôler les inondations, faciliter l'irrigation et permettre la production d'énergie hydroélectriques (Silva et al., 2017; Siegmund-Schultze et al., 2018). Ces barrages sont également reliés à des activités économiques comme l'aquaculture et la pêche (Siegmund-Schultze et al., 2018).

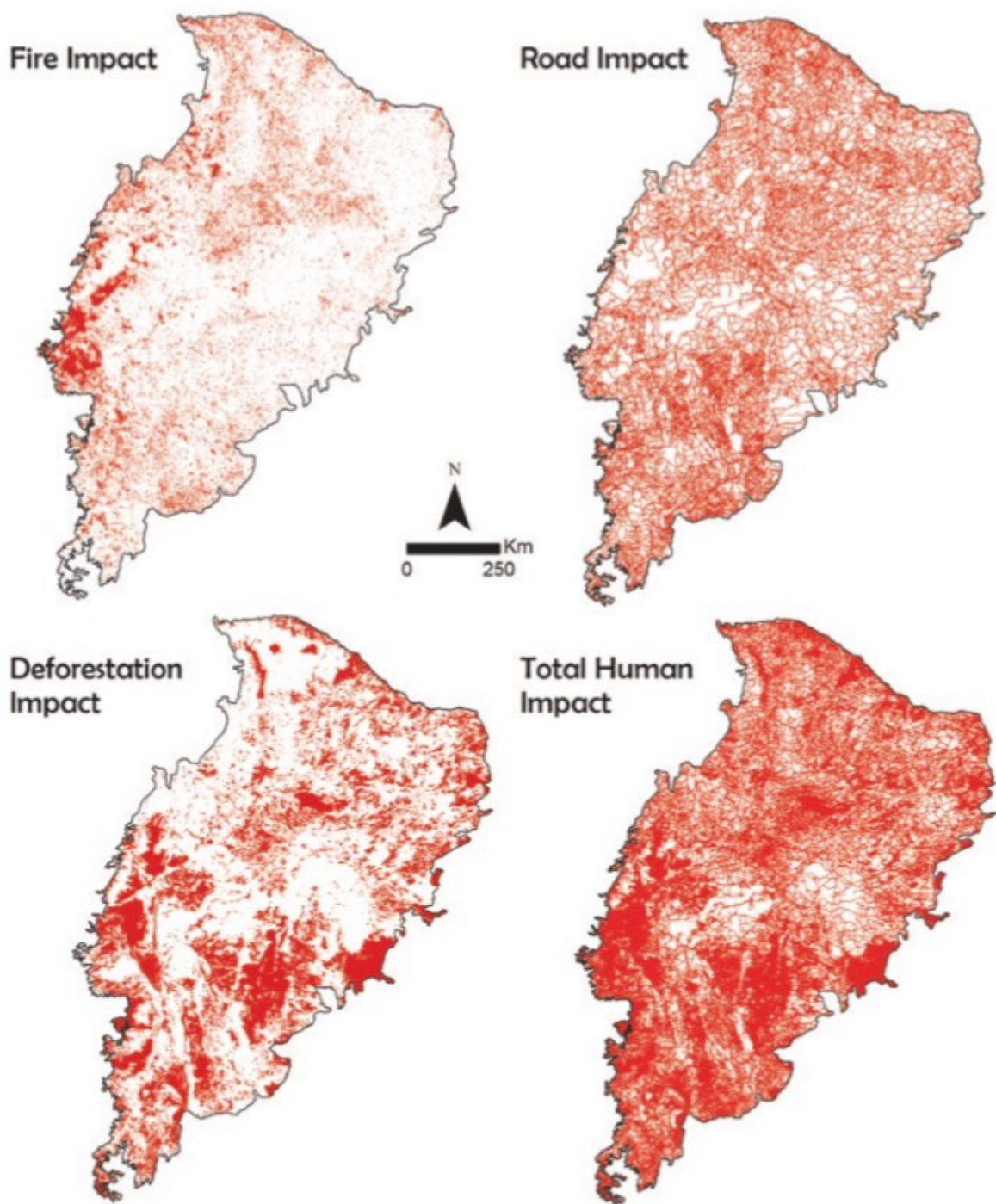


Figure 2.7 : Distribution géographique des impacts du feu, des routes, du changement d'usage des sols et des trois facteurs combinés (impact anthropique total) dans la Caatinga en 2010.

Source : Silva et al., (2017)

Les projets visent le développement socioéconomique de la région mais leurs conséquences écologiques sont beaucoup moins étudiées (Araújo, 2009). Certaines problématiques sont cependant connues depuis longtemps, notamment l'évaporation importante et les changements écologiques associés à la mise en place de barrages (Schnell, 1966). Une altération du milieu peut aussi conduire à la réduction des débits des cours d'eau, voire à leur disparition complète avec le temps (Souza Nascimento, 2001). Ainsi, certains cours d'eau anciennement permanents et navigables sont maintenant asséchés une partie de l'année (Leal et al., 2005). Avec une augmentation des sécheresses, ces réserves d'eau s'évaporent plus rapidement et ne seront vraisemblablement plus suffisantes pour satisfaire toute la population (Silva et al., 2017). Ceci soulève une problématique de gestion de l'eau et des conflits d'usages à l'échelle du biome, surtout en temps de pénurie (Siegmond-Schultze et al., 2018).

2.2 Changements climatiques et leurs impacts dans la Caatinga

Des méta-analyses montrent qu'il existe déjà des effets visibles des changements climatiques sur différentes espèces, tant animales que végétales, à l'échelle planétaire et que ceux-ci suivent les prédictions établies (Parmesan et Yohe, 2003; Root et al., 2003). Les variations de température, associées à d'autres contraintes comme la détérioration des habitats, ont notamment une influence sur la composition des communautés et peuvent mener à des diminutions voir des extinctions pour certaines espèces (Root et al., 2003). L'indice de sensibilité de la végétation de Seddon et al. (2016) identifie les régions du monde qui ont été les plus sensibles aux variations climatiques dans les quatorze dernières années. La Caatinga est une de ces régions écologiquement sensibles et vulnérables pouvant présenter des réponses amplifiées aux fluctuations du climat (Marengo, 2008), principalement aux variations de disponibilité en eau (Seddon et al., 2016). Les sections suivantes exposent les prévisions climatiques actuelles et leurs impacts réels et anticipés sur ce biome.

2.2.1 Prévisions climatiques

Dans l'histoire géologique, la forêt tropicale saisonnière sèche du Brésil a déjà connu des fluctuations de sa couverture géographique, avec des périodes d'extension (entre autres pendant le Pléistocène et le début de l'Holocène) puis une certaine stabilité (Leal et al., 2003; Werneck et al.,

2011). Les changements climatiques prédits pourraient avoir plusieurs effets, notamment une possible extension géographique de ce biome selon Werneck et al. (2011). Certaines parties de la Caatinga pourrait également devenir plus arides avec des changements au niveau de la structure et de la composition de la végétation (Marengo, 2008; Oliveira et al., 2012).

La plupart des modèles climatiques actuels indiquent une augmentation des températures et une diminution des précipitations au niveau de la Caatinga avant la fin du 21^{ème} siècle (Marengo, 2008; Magrin et al., 2014; Althoff et al., 2016; Pinheiro et al., 2017; Silva et al., 2017) (Figure 2.8). Les scénarios optimistes prédisent une augmentation des températures moyennes annuelles entre 1 et 3° Celsius ainsi qu’une diminution de 10 à 15% des précipitations (Marengo, 2008; Silva et al., 2017). Les scénarios pessimistes annoncent quant à eux une augmentation de 2 à 4, voir 5°C de la température moyenne annuelle et une diminution des précipitations entre 15 et 20%, pouvant aller jusqu’à 40% (Marengo, 2008; Magrin et al., 2014). Les tendances sont cependant plus marquées pour les températures que pour les précipitations (Figure 2.9).

Les évènements extrêmes, principalement des pluies torrentielles et des sécheresses sévères, devraient devenir de plus en plus récurrents dans cette région (Marengo, 2008; Silva et al., 2017; IPCC, 2019). Le nombre de jours secs consécutifs devrait augmenter en parallèle d’une réduction de la durée de la saison des pluies, aggravant ainsi le déficit en eau de cette région (Marengo, 2008). La transpiration devrait augmenter et l’évaporation et le ruissellement annuels baisser (Pinheiro et al., 2017; Silva, Leal et al., 2017). Les sols, en surface, pourraient alors s’assécher (Silva et al., 2017), les réserves d’eau souterraines diminuer jusqu’à 70% d’ici 2050 et le débit de certains cours d’eau, comme le Rio São Francisco, pourrait réduire de 15 à 70% (Marengo, 2008; Montenegro et Ragab, 2010). En tenant compte des problèmes associés à la ressource hydrique déjà présents actuellement, le Nord-Est est ainsi une des régions brésiliennes les plus exposées et vulnérable aux changements climatiques (Marengo, 2008). Les scénarios extrêmes signalent que les changements pourraient mener à la désertification complète du biome et la disparition de la saison des pluies (Marengo, 2008; Silva et al., 2017).

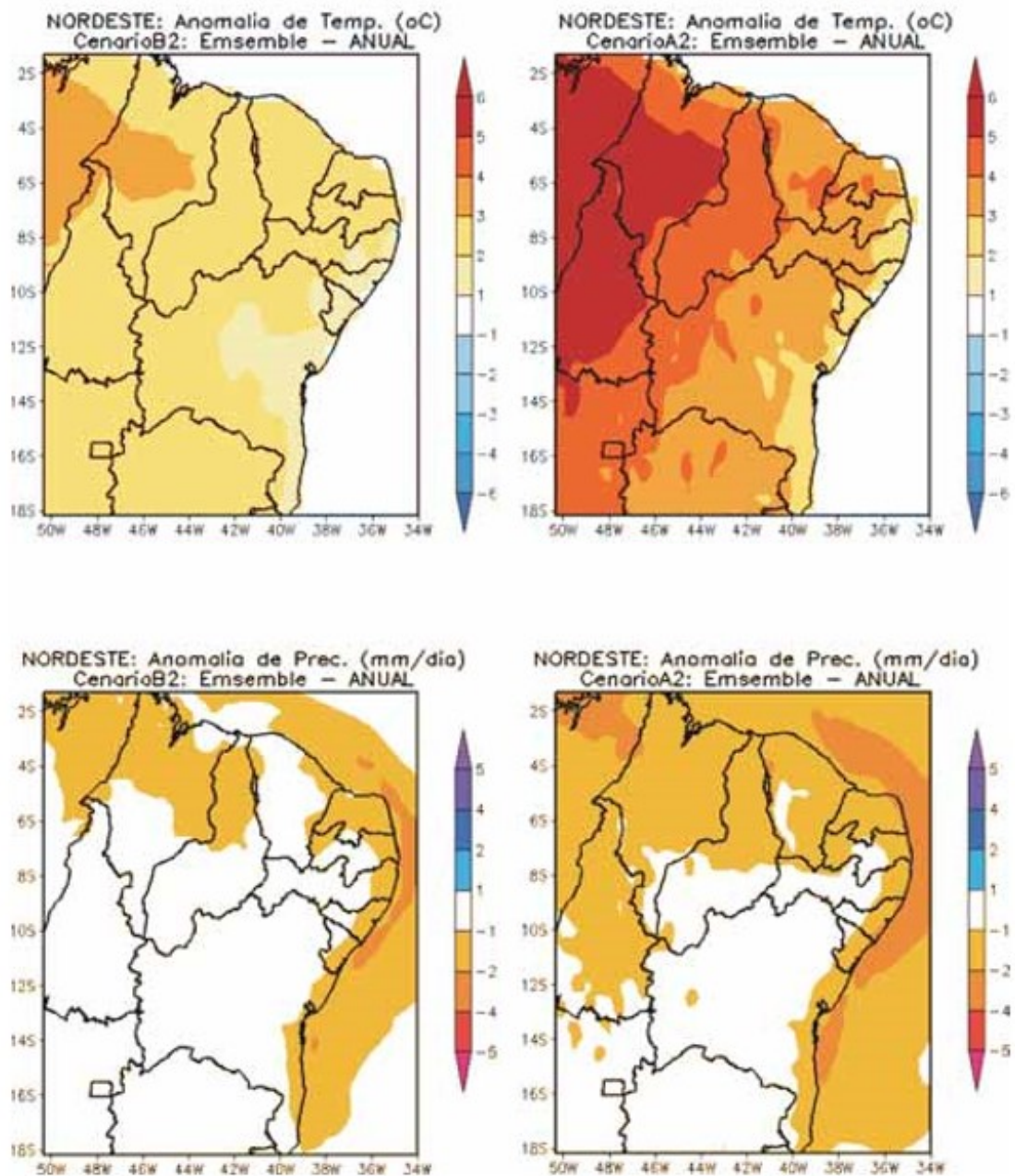


Figure 2.8 : Prédictions des anomalies annuelles de températures (cartes du haut) et de précipitations (cartes du bas) dans le futur (2071-2100) pour le Nord-Est du Brésil. La période de référence est 1960-1990 et les cartes sont basées sur la moyenne de trois modèles régionaux pour les scénarios d'émissions faibles (cartes de gauche) et importantes (cartes de droite). Les valeurs de température sont en degrés Celsius et celles des précipitations en mm/jour. Les couleurs orangées représentent des valeurs de températures plus élevées (en haut) et des valeurs de précipitations plus faibles (en bas).

Source : Marengo, (2008)

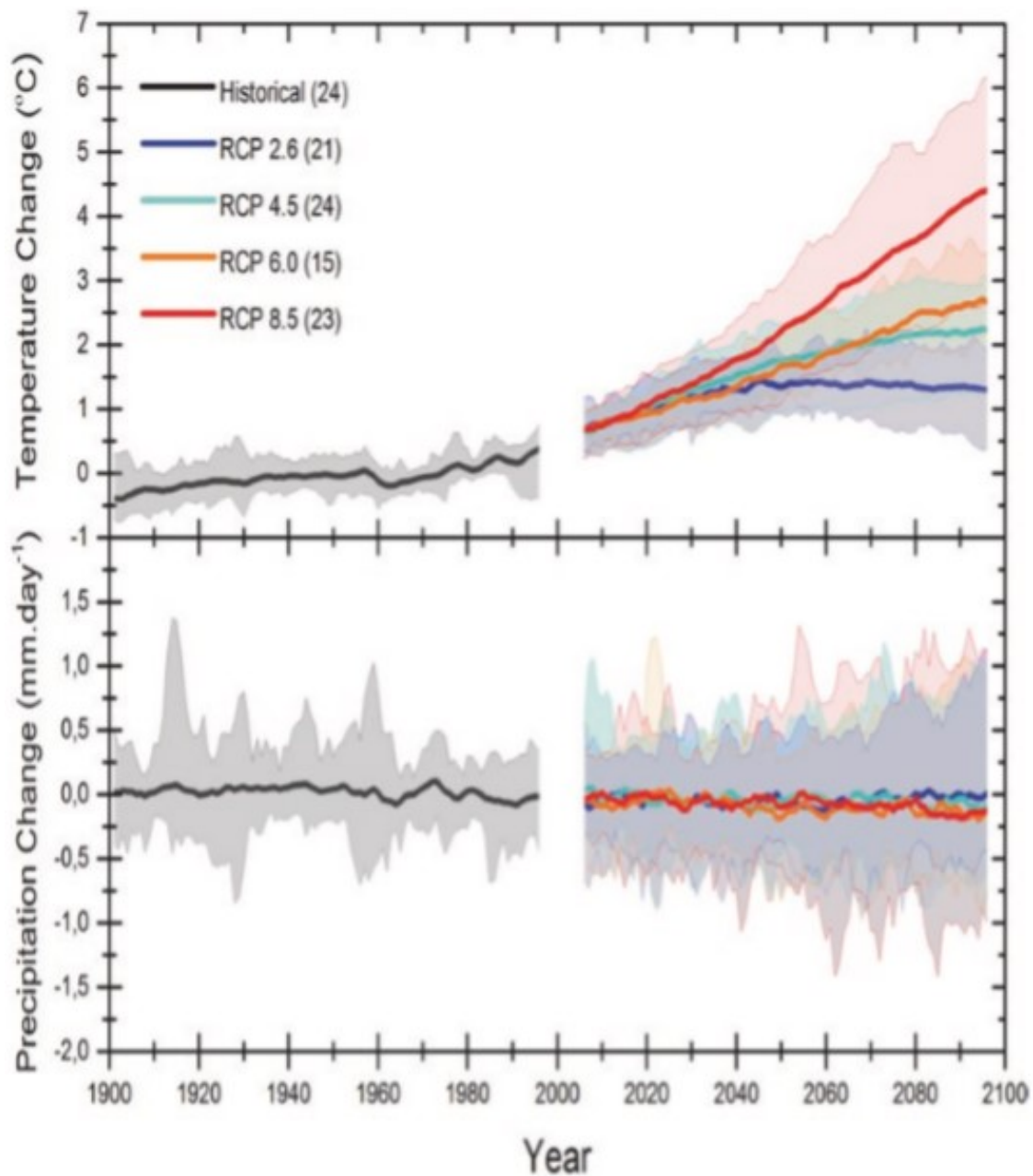


Figure 2.9 : Séries temporelles des anomalies de températures (graphique du haut) et de précipitations (graphique du bas) pour la région de la Caatinga avec des simulations basées sur les valeurs historiques (à gauche en noir) et sur les prédictions (à droite en couleurs). Les valeurs de température sont en degrés Celsius et celles des précipitations en mm/jour. La période de référence est 1961-1990 et toutes les séries chronologiques ont été lissées à l'aide d'une moyenne mobile sur cinq ans pour une meilleure visualisation. Le nombre de modèles utilisé dans chaque groupe est présenté entre parenthèses.

Source : Silva et al., (2017)

La Caatinga est déjà sensible aux sécheresses, au manque d'eau et à la désertification (Montenegro et Ragab, 2010; Vieira et al., 2013; Spinoni et al., 2015), avec 94% de son territoire ayant un risque moyen à élevé de désertification (Vieira et al., 2015) (Figure 2.10). L'augmentation des températures et la diminution des précipitations accentueront probablement ces phénomènes (Marengo, 2008). La désertification aura elle aussi de possibles impacts, notamment la diminution significative des précipitations, l'expansion des zones désertiques vers le sud et l'augmentation des températures du sol en surface (Souza et Oyama, 2011). Un cercle vicieux pourrait alors se créer, amplifiant et accélérant la détérioration du biome.

La désertification de la Caatinga aura des impacts potentiels sur la biodiversité, la disponibilité et la qualité de la ressource hydrique, le stockage du CO₂ et les autres services écosystémiques fournis par les différents écosystèmes (Silva et al., 2017). La Caatinga, qui agit principalement comme un puit de carbone pendant la saison des pluies et au début de la saison sèche, devient une source de carbone à la fin de cette dernière lorsque la photosynthèse diminue en réponse au stress hydrique auquel sont soumis les plantes (Oliveira et al., 2006; Silva et al., 2017). La désertification et l'augmentation de la durée de la saison sèche, liées à une augmentation des températures et à une diminution des précipitations, pourraient ainsi réduire la capacité de stockage du carbone de la végétation de la Caatinga (Silva et al., 2017). Ce biome pourrait ainsi potentiellement devenir plus souvent une source de CO₂.

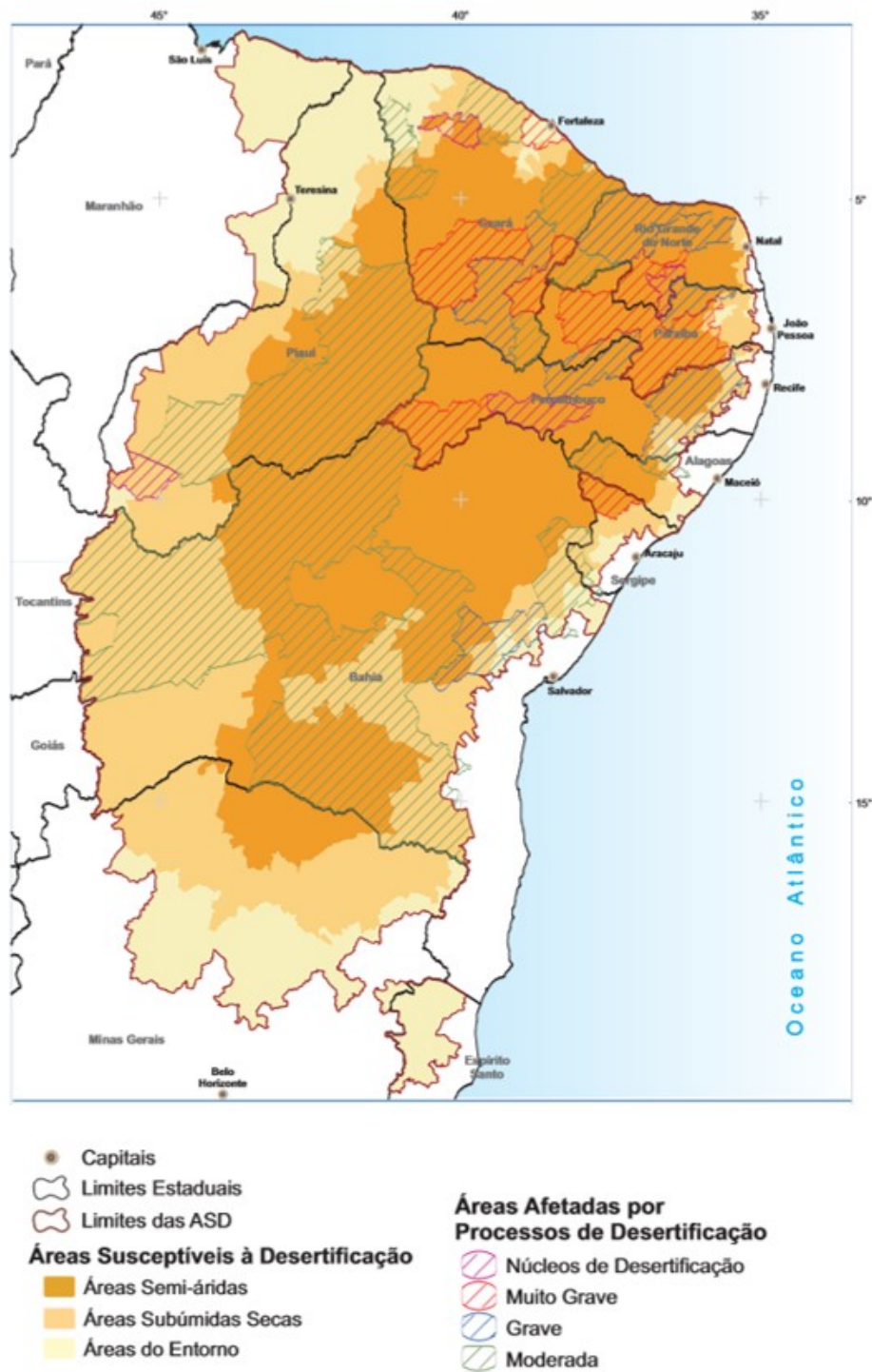


Figure 2.10 : Carte des zones affectées (hachurées sur la carte) et susceptibles d'être affectées (différentes teintes orangées sur la carte) par la désertification dans le Nord-Est du Brésil.

Source : MMA et al., (2007)

2.2.2 Impacts anticipés des changements climatiques dans la Caatinga

À l'échelle de l'Amérique du Sud, les principaux risques associés aux changements climatiques mentionnés sont une baisse des ressources en eau potable, une augmentation des inondations en zones urbaines et rurales, une baisse de la production alimentaire et la diffusion de maladies (IPCC, 2007, 2014, 2019; Réseau Action Climat France, 2014). Ceux-ci seraient principalement dus à l'augmentation des températures ainsi qu'à la récurrence plus importante de températures extrêmes et d'évènements tels que les fortes pluies et les sécheresses (IPCC, 2007, 2014, 2019).

Selon certains auteurs, la Caatinga serait, avec le Cerrado, un biome résistant aux changements climatiques au niveau de la végétation et aurait de ce fait, tendance à gagner en expansion par rapport à d'autres biomes comme la Forêt Amazonienne (Rodrigues et al., 2015; Zanin et al., 2017). Souza et al. (2016) indiquent en effet que la végétation de la Caatinga supporte bien les variations interannuelles de pluie avec une saison de croissance de la végétation plus stable et plus longue (3 mois en moyenne) que la saison des pluies (qui dure environ 2 mois). En revanche, d'autres auteurs, comme Seddon et al., (2016), expliquent que la Caatinga est un des biomes planétaires particulièrement sensible aux changements climatiques et à leurs impacts, spécialement par rapport à la disponibilité de l'eau. En effet, la croissance de la végétation, notamment les arbres, est intimement liée aux quantités de précipitations dans la Caatinga (Aragão et al., 2019). Au-delà d'une certaine limite, les changements de durée et d'intensité de la saison des pluies pourraient affecter négativement le taux d'humidité des sols ainsi que les taux d'évapotranspiration et la croissance de la végétation (Souza et al., 2016). L'augmentation de la durée et de l'intensité de la saison sèche augmenterait aussi le taux de mortalité des arbres (Rodrigues et al., 2015). Les espèces actuellement retrouvées dans la forêt tropicale saisonnière sèche, comme *Anadenanthera colubrina*, *Aspidosperma pyrifolium* et *Myracrodruon urundeuva*, pourraient alors se retrouver au niveau des forêts tropicales et des savanes alors que l'aridité croissante dans la Caatinga ne permettrait plus de supporter leur développement. Il y aurait alors un déplacement de l'aire de répartition de certaines espèces végétales représentatives de la Caatinga (Rodrigues et al., 2015). Les changements au niveau des températures et des précipitations pourraient également favoriser le développement et la propagation d'espèces exotiques envahissantes, hautement compétitrices et qui sont déjà actuellement des menaces pour les espèces indigènes (Cavalcante et Major, 2006).

Ce biome sera également affecté par la perte de couvert forestier, d'habitats spécifiques et d'espèces endémiques due aux changements climatiques (Zanin et al., 2017). Ils vont accentuer la disparition d'espèces et les changements au niveau de la phénologie, des interactions écologiques et de la distribution géographique des espèces (Araujo et Rahbek, 2006; Loyola et al., 2012). Toutefois, toutes les espèces ne seront pas nécessairement influencées de la même manière par ces changements. Au Brésil, on anticipe par exemple une diminution importante de l'aire de répartition de 55 espèces de marsupiaux (Loyola et al., 2012). Au contraire, d'autres espèces pourraient ne pas être significativement affectées par les changements climatiques. *Rhinella granulosa* est une espèce de grenouille dont l'aire de répartition ne devrait pas être modifiée avant au moins 2080 en tenant compte des changements de températures et de précipitations prévus (Oliveira et Cassemiro, 2013). Une étude de Tavares-Damasceno et al., (2017) montre aussi que l'intensité des sécheresses dans la Caatinga influence *Coryphospingus pileatus*. En effet, le taux de survie de cette espèce d'oiseau peut diminuer de plus de 50% lors de périodes de sécheresses sévères. L'augmentation des températures et des événements extrêmes pourraient influencer son taux de survie à long terme et éventuellement mener à sa disparition (Tavares-Damasceno et al., 2017). Des effets négatifs au niveau de la diversité et des populations pourraient aussi se faire sentir chez les insectes, comme les fourmis, et les communautés microbiennes des sols avec de possibles réactions en chaîne, notamment sur le cycle des nutriments et les plantes (Arnan et al., 2018; Bononi et al., 2018). Les fragments de végétation naturels gardés intacts joueront un rôle majeur de refuge climatique pour les espèces, notamment celles endémiques de la Caatinga (Loyola et al., 2012; Oliveira et al., 2012).

Outre les menaces qui pèsent sur la biodiversité (Oliveira et al., 2012), les changements climatiques prévus auront un impact sur les activités humaines telles que l'agriculture, l'élevage et l'utilisation des ressources comme le bois et l'eau (Marengo, 2008; Montenegro et Ragab, 2010; Althoff et al., 2016). En effet, actuellement il faut 50 ans après coupe pour la régénération complète de la biomasse (Althoff et al., 2016). Or, si le climat devient plus aride, la biomasse mettra plus de temps, voire ne pourra plus se régénérer et la coupe et l'utilisation du bois deviendront difficiles (Althoff et al., 2016). De plus, les difficultés d'accessibilité à l'eau vont augmenter avec la diminution des précipitations et l'augmentation des températures, engendrant des répercussions importantes pour l'agriculture de subsistance (Marengo, 2008; Magrin et al., 2014). L'irrigation soutenue deviendra à

la fois inévitable et impossible dans certaines régions de la Caatinga (Marengo, 2008). La réduction de la quantité d'eau dans les lacs, les cours d'eau et les nappes phréatiques sera également problématique pour le bétail et la disponibilité de l'eau pour la consommation humaine, tant dans les milieux ruraux qu'urbains (Marengo, 2008). Ainsi, près de 41 millions d'habitants pourraient avoir des problèmes d'accès à l'eau en 2025 si des infrastructures ne sont pas mises en places, et l'accroissement de la population viendra aggraver la situation (Marengo, 2008; ANA, 2018). Les inondations et les sécheresses accentueront aussi les risques sanitaires et de sécurité alimentaire (Marengo, 2008; Silva et al., 2017). S'ajoute alors le risque de déplacement des populations vers des zones où l'agriculture irriguée et les conditions de vie en général seront plus faciles (Marengo, 2008).

2.3 Freins aux transformations et à l'adaptation aux changements climatiques dans la Caatinga

Les changements climatiques ont un impact négatif sur les activités humaines, mais celles-ci ont également un impact négatif sur le milieu. En effet, les activités anthropiques telles que l'agriculture, l'élevage et la coupe forestière viennent accentuer et aggraver les effets des changements climatiques (Silva et al., 2017). Ces perturbations, qu'elles soient ponctuelles ou chroniques, créent un stress sur l'environnement et ont un impact sur la biodiversité, la résistance et la résilience de la Caatinga (Rito et al., 2017; Salvatierra et al., 2017; Silva et al., 2017). Le manque de connaissances et de données sur ce biome est un obstacle majeur pour avoir une meilleure compréhension des conséquences réelles des changements et permettre une transformation des activités et une adaptation des techniques (Magrin et al., 2014; Silva et al., 2017).

2.3.1 Recherches et données scientifiques limitées pour le biome de la Caatinga

Les connaissances et les recherches sur la Caatinga, notamment sur la biodiversité et les changements climatiques, sont encore peu nombreuses actuellement (Leal et al., 2003; Santos et al., 2011; Magrin et al., 2014; Silva et al., 2017; Arnan et al., 2018; Aragão et al., 2019). Par exemple, les effets combinés des changements climatiques et des perturbations anthropiques sur la végétation restent peu connus (Rito et al., 2017). Ceci pose des problèmes pour la compréhension des processus écologiques et la connaissance de ce biome en général (Silva et al., 2017). Ce manque de connaissance est encore plus limitant pour permettre une analyse des changements ayant déjà survécu, actuels, ou qui se feront sentir dans le futur (Silva et al., 2017). De plus, malgré les progrès

techniques et informatiques des dernières années, les modèles climatiques utilisés ont encore certaines faiblesses, notamment au niveau de la résolution spatiale et de certains paramètres physiques inadéquats, ce qui rend les projections plus incertaines (Silva et al., 2017). Avec les changements actuels, il existe un besoin continu de mise à jour des connaissances pour conserver des données utilisables (Magrin et al., 2014). Or, l'obtention de données climatiques et hydrologiques fiables, complètes et de qualité qui couvrent la totalité du biome est encore difficile (Magrin et al., 2014; Zanin et al., 2017). Sur ces différents points, les sciences participatives peuvent être bénéfiques car elles permettent l'accumulation de données fiables, à long terme et à grande échelle (Silvertown, 2009; Dickinson et al., 2012; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Le manque de multidisciplinarité dans les recherches réalisées, tant au niveau de la collecte que de l'analyse des données, peut également engendrer des biais d'interprétation des résultats (Magrin et al., 2014; Santos et al., 2014), comme par exemple pour l'adaptation des espèces végétales face à des contraintes environnementales importantes comme les sécheresses prolongées (Santos et al., 2014). Ceci limite aussi notre compréhension des interactions entre les systèmes naturels et humains (Araújo et al., 2007; Magrin et al., 2014). Des études multidisciplinaires à long terme sont donc nécessaires pour mieux comprendre et prévoir les réponses et stratégies adaptatives des espèces de la forêt tropicale sèche face aux changements climatiques et à la pression anthropique (Rodrigues et al., 2015). Les sciences participatives, qui sont un moyen efficace de regrouper différents acteurs, peuvent faciliter la multidisciplinarité dans le processus scientifique (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Delgado et Åm, 2018; Hecker et al., 2018).

La diffusion des données est un autre aspect limitant, car la plupart des résultats sont disponibles seulement dans la littérature grise (Magrin et al., 2014). Le manque d'accumulation et de transmission de connaissances à l'échelle de la Caatinga rendent difficiles la prise de décisions et la mise en place d'actions de protection, de conservation et d'adaptation (Santos et al., 2011). La diffusion des données est un des aspects couverts par les programmes de sciences participatives qui favorise la transmission et la vulgarisation de l'information et des résultats, tout en permettant l'accumulation de connaissances (Bonney et al., 2009; Mathieu, 2011; Couvet et Teyssède, 2013).

2.3.2 Gouvernance : gestion de l'adaptation aux changements climatiques

La Caatinga a pendant longtemps été considérée comme moins importante écologiquement que le reste du Brésil (Leal et al., 2003). Néanmoins, depuis quelques années cette tendance s'est inversée et des programmes en lien avec l'environnement et les changements climatiques existent maintenant (Leal et al., 2003). Le Tableau 2.1 présente plusieurs de ces programmes ainsi que les organismes qui les ont mis sur pied ou qui en ont la charge. D'autres entités, comme l'*Interamerican Institute for Global Change Research* (IAI), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), Le Fonds pour l'environnement mondial (FEM), la Banque interaméricaine de développement (IDB) et le Conseil international pour les initiatives écologiques locales (ICLEI) œuvrent aussi dans le développement de programmes et d'initiatives pour faciliter la recherche en général et mettre en place des stratégies d'adaptation et d'atténuation des impacts des changements climatiques et des activités humaines (Magrin et al., 2014).

Les programmes et les initiatives ne permettent toutefois pas d'améliorer la situation à la hauteur des enjeux, ni d'engendrer de réels changements de comportements (Marengo, 2008). Par exemple, la construction de citernes permet de résoudre un problème d'accès et de stockage de l'eau à court terme mais elle ne constitue pas une solution viable en cas de sécheresse prolongée sur plusieurs années (Marengo, 2008). De plus, la réponse des gouvernements face aux demandes persistantes de la population de la Caatinga pour obtenir plus d'investissements et de développement économique consiste souvent en l'élaboration d'infrastructures et de projets de grande envergure, comme les barrages, qui ont souvent des impacts néfastes sur l'environnement (Silva et al., 2017). Ceci résulterait de la déconnexion entre les politiques sociale et environnementale, qui ont pourtant de grandes répercussions l'une sur l'autre (Silva et al., 2017). Marengo (2008) rappelle aussi que des politiques environnementales à long terme, comme le programme d'éducation environnementale, sont essentiels pour permettre à la population de comprendre les effets et les impacts des changements climatiques et ainsi faciliter un changement des comportements et l'adaptation des communautés. Les sciences participatives, qui rassemblent les acteurs politiques, les scientifiques et les citoyens, sont aussi un moyen intéressant pour inclure les populations et faciliter la communication et la prise de décisions localement (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Tableau 2.1 : Programmes associés à la biodiversité et aux changements climatiques et organismes impliqués dans les projets

Programmes	Organismes	Description
<p><i>Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH)</i></p> <p>Programme de suivi du temps, du climat et des ressources hydriques (INPE et CPTEC, 2019b)</p>	<p>Initiative de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ministère des sciences et de la technologie <p>Exécuté par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) et Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) 	<p>Les objectifs du programme sont le développement de la recherche, l'amélioration des techniques de surveillances et la mise à disposition d'applications pratiques dans les domaines de la météorologie et des ressources hydriques.</p>
<p><i>Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Nordeste (Proclima)</i></p> <p>Programme de suivi climatiques en temps réel de la région Nord-Est (INPE et CPTEC, 2019a)</p>	<p>Initiative de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) - Ministère du développement régional <p>Exécuté par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - CPTEC et INPE 	<p>Le but principal du programme est de surveiller et de suivre l'évolution de la saison des pluies dans le Nord-Est du Brésil (région de la Caatinga) en prenant plusieurs données notamment le nombre de jours avec un déficit hydrique pendant la saison des pluies.</p>
<p><i>Programa Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN-Brasil)</i></p> <p>Programme national de lutte contre la désertification et d'atténuation des effets de la sécheresse (De Lima, s.d.)</p>	<p>Ministère de l'environnement</p>	<p>Ce programme aide à définir les lignes directrices et les principales actions à poser pour prévenir et lutter contre la désertification dans les régions arides et semi-arides du Brésil.</p>
<p><i>Sistema Brasileiro de Alerta Precoce contra Seca e Desertificação (SAP)</i></p> <p>Système brésilien d'alerte rapide des sécheresses et de la désertification (INPE, 2016)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère de l'environnement - Ministère des sciences et de la technologie - INPE - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) 	<p>Ce programme vise la création et la mise en place d'un système permettant de prévenir plus rapidement les grands épisodes de sécheresse qui touchent la région et de fournir un outil permettant d'identifier les zones les plus affectées par la désertification.</p>
<p><i>“Um Milhão de Cisternas” (P1MC)</i></p> <p>« Un million de citernes » (ASA, s.d.; Baracho, 2013)</p>	<p>Articulação do Semi-Árido (ASA)</p>	<p>L'ASA est une organisation non gouvernementale qui réunit plus de 700 entités de la société civile pour lutter contre les effets de la sécheresse dans le pays.</p> <p>L'objectif du programme était de construire de nombreuses citernes dans les lieux les plus touchés par la sécheresse pour permettre un accès plus sécuritaire à la ressource hydrique pour les habitants.</p>
<p><i>Programa Nacional de Educação Ambiental (ProNEA)</i></p> <p>Programme national d'éducation environnementale (MMA, 2018a, 2018b)</p>	<p>Ministère de l'environnement</p>	<p>Programme visant le développement de l'éducation environnementale et plus largement la diffusion en milieu scolaire des piliers du développement durable (environnement, économie et socioculturel).</p>

Les bourses mises en place pour aider les familles les plus pauvres dans différentes parties du Brésil, notamment dans la Caatinga, permettent de diminuer un peu la pression sur les ressources et l'environnement (FAO, 2016). En revanche, les politiques associées au développement de la production agricole et à l'élevage, principalement par le biais d'incitatifs financiers, engendrent souvent des effets négatifs sur les écosystèmes, avec par exemple une hausse de la déforestation (FAO, 2016). Les aires protégées, actuellement très peu nombreuses dans le biome, ne permettent pas non plus de préserver adéquatement la biodiversité et les services écosystémiques du territoire (Leal et al., 2003; Salvatierra et al., 2017). En effet, en 2012, seulement 1% du territoire était conservé selon Oliveira et al. (2012). La Figure 2.11 présente la distribution d'une partie de la richesse floristique de la Caatinga ainsi que des espèces menacées parmi celles-ci. Elle permet également de visualiser la répartition et la superficie des aires protégées (Koch et al., 2017). Ces cartes révèlent que malgré la connaissance des espèces, de la richesse biologique et des risques, le manque de protection efficace est encore bien présent. La télédétection et la cartographie pourraient être des solutions intéressantes. Ce sont des outils permettant d'obtenir une bonne représentation du territoire et de suivre son évolution (Pacheco, 2017). En complément de la cartographie, des algorithmes peuvent aussi être utilisés pour faciliter la sélection rapide et efficace des zones à protéger sur le territoire, surtout si les informations biologiques sont peu disponibles (Leal et al., 2003). Kasecker et al. (2018) combinent des indicateurs de pauvreté, la couverture végétale et la modélisation des changements climatiques pour permettre de sélectionner des zones à protéger et faciliter la mise en place de politiques municipales et nationales adéquates. Le développement d'un programme de science participative permettrait aussi de valoriser ces écosystèmes et de sensibiliser et impliquer la population pour sa préservation (Hecker et al., 2018).

La Caatinga est un biome où la nature et l'homme ont toujours été extrêmement interreliés. À la fois riche en biodiversité et vulnérable aux changements climatiques, les connaissances sur celui-ci restent encore à développer. Ce chapitre a permis de mieux comprendre les dynamiques existantes, à la fois biologiques, sociales et politiques. Il a également mis en avant l'importance de la préservation de cet environnement unique et l'intérêt de la prise de données scientifiques et de la sensibilisation des populations. Tout ceci permet de proposer un programme de science participative adapté aux réalités de la Caatinga et incluant l'intégralité et la diversité de celle-ci.

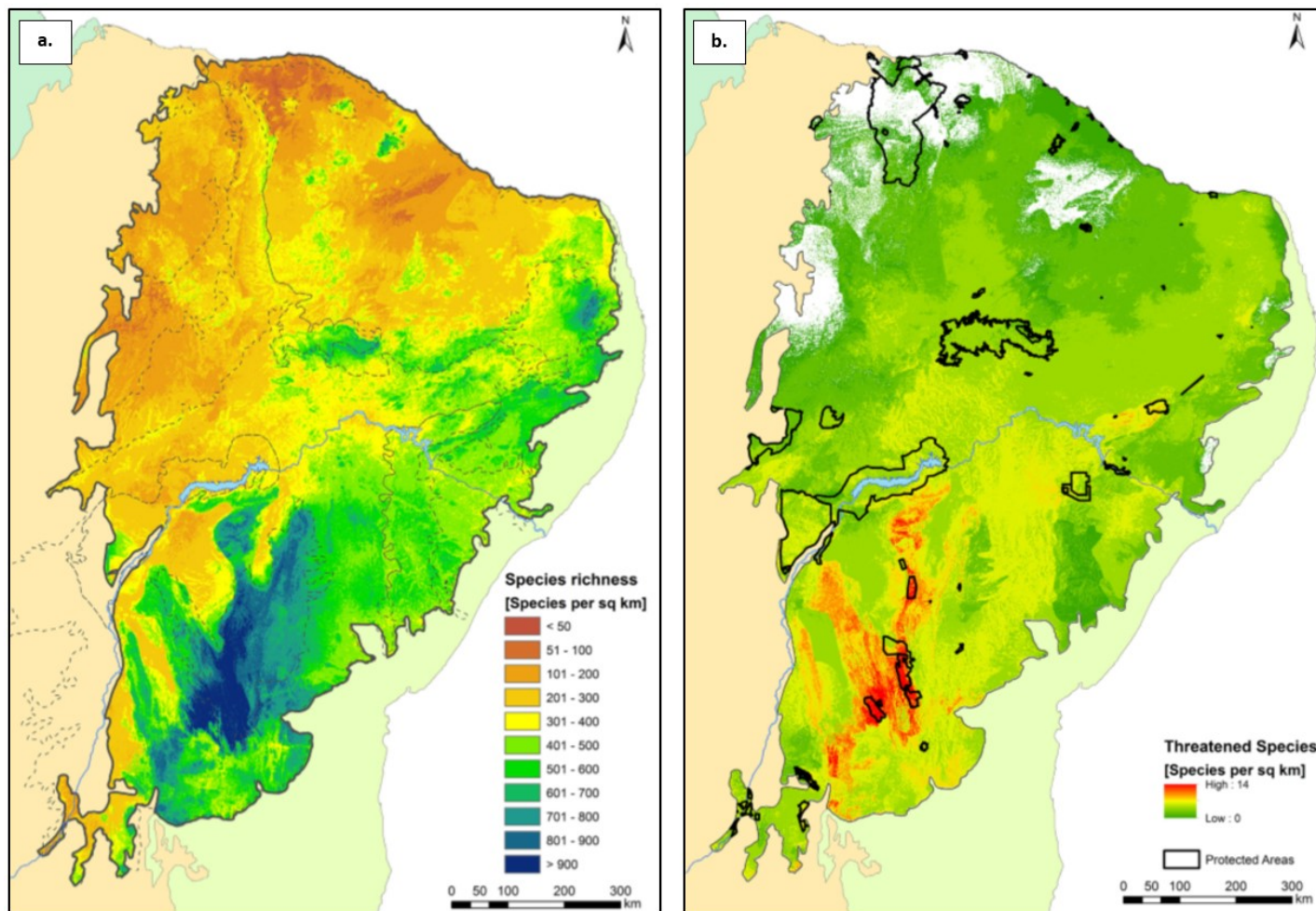


Figure 2.11 : Richesse spécifique floristique projetée (a.) et espèces menacées (27 espèces floristiques) (b.) à l'échelle de la Caatinga. La carte de droite présente également les aires protégées existantes.

Source : Koch et al., (2017)

Chapitre 3

Programme de science participative pour le suivi des changements climatiques à l'échelle de la Caatinga

Le chapitre 3 se base sur les notions de science participative abordées dans le chapitre 1 et le contexte écologique et social établi au chapitre 2 pour proposer les composantes fondamentales nécessaires à l'élaboration d'un programme de science participative applicable à l'échelle de la Caatinga. Ce chapitre développe l'idée d'un suivi des changements climatiques au niveau du biome en alliant la recherche scientifique à l'implication des populations locales. Ce programme vise l'obtention de données scientifiques à grande échelle tout en combinant l'éducation et la sensibilisation. Les différentes parties du chapitre abordent la structure et les objectifs d'un tel programme, les bases nécessaires à son développement, l'intérêt et les défis d'un tel projet et les grandes étapes de sa mise en place et de son suivi.

3.1 Présentation du programme *Sentinelas*

Les changements climatiques actuels et futurs observables dans la Caatinga, ainsi que leurs impacts tangibles et anticipés (Figure 3.1), ont servi à déterminer les questions de recherche qui feront l'objet du programme de sciences participatives *Sentinelas*. Une présentation générale de ce programme, soit les réponses aux questions : Quoi?, Qui?, Quand?, Où?, Pourquoi?, se retrouve dans le Tableau 3.1. Le terme *Sentinelas* (sentinelles en français) a été choisi parce qu'il réfère à tous les participants impliqués dans le projet qui seront les observateurs et surveillants de l'évolution du climat de la Caatinga et deviendront possiblement des défenseurs de cet environnement et des acteurs de changements (Silvertown, 2009). Les sciences participatives étant peu connues et répandues au Brésil, l'implication et la participation des citoyens dans le programme sera, dans un premier temps, principalement au niveau de la collecte des données (Niveau 1 : « Crowdsourcing », Figure 1.1).

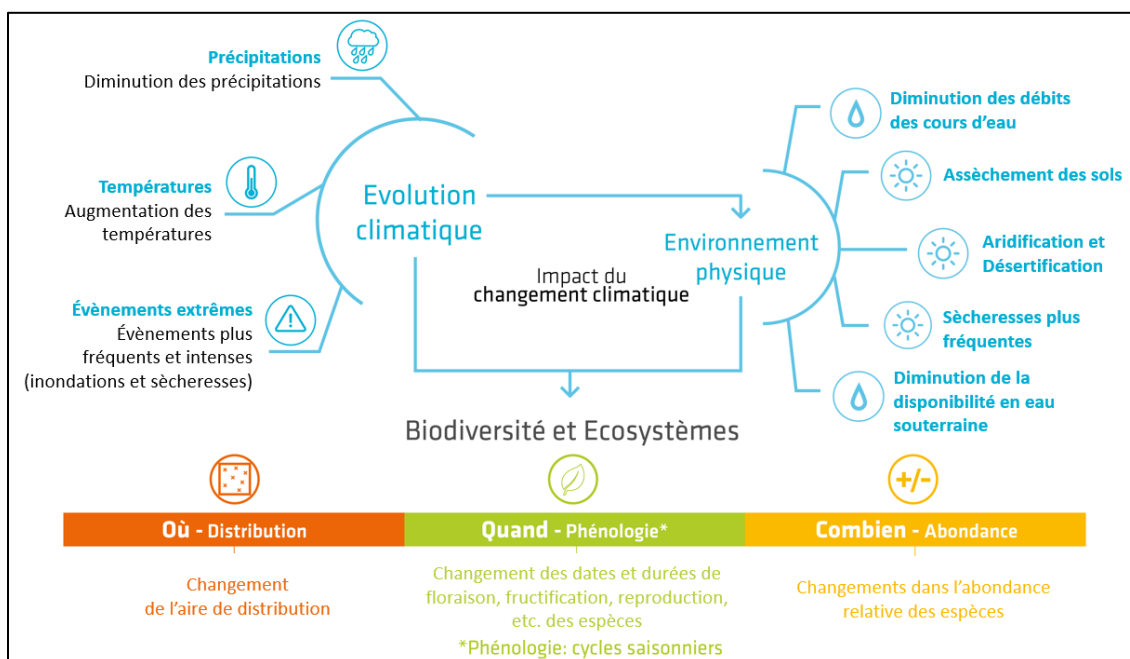


Figure 3.1 : Résumé des impacts des changements climatiques et de leurs répercussions sur la biodiversité et les écosystèmes de la Caatinga.

Adapté de : CREA Mont-Blanc, (2019a)

Tableau 3.1 : Présentation générale du programme *Sentinelas*

Quoi ?	Projet de science participative de type « <i>Crowdsourcing</i> » où la collecte est faite par les participants et l'analyse par les scientifiques.
Qui ?	<ul style="list-style-type: none"> - Les scientifiques et les partenaires impliqués définissent clairement le ou les problèmes environnementaux. - Les scientifiques élaborent et dirigent le projet, analysent et interprètent les données, rédigent et vulgarisent. - Dans le cadre scolaire dans un premier temps : les participants, principalement les élèves et leurs professeurs, collectent les données et participent à la diffusion des résultats.
Quand ?	Possibilité de réaliser les observations à différents moments selon les thèmes choisis. Le temps consacré au programme dépend principalement de l'intérêt de l'enseignant en charge de la classe et des autres activités scolaire, certains thèmes étant plus rapides que d'autres à réaliser et à suivre. Exemples de thèmes : dates de floraison et de fructification de différentes espèces d'arbres ; périodes de reproduction d'espèces animales indicatrices ; dates, heure et quantité d'eau tombées pendant une pluie et les impacts observés.
Où ?	<ul style="list-style-type: none"> - À l'échelle de la Caatinga. - Principalement dans les écosystèmes forestiers.
Pourquoi ?	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer un suivi de la biodiversité et des écosystèmes dans le contexte des changements climatiques. - Sensibiliser les jeunes aux impacts des changements climatiques.

Inspiré de : Wilderman, (2007) et Houllier et Merilhou-Goudard, (2016)

3.1.1 Analyse des opportunités et des menaces pour l’implantation d’un programme de science participative dans la Caatinga

L’analyse du contexte global dans lequel s’intégrera le programme *Sentinelas* permet d’orienter stratégiquement son élaboration. Cette analyse fait ressortir les facteurs externes à la fois favorables et défavorables à l’implantation d’un programme de sciences participative dans la Caatinga : les opportunités et les menaces (Figure 3.2) (Helms et Nixon, 2010; Gürel et Tat, 2017).

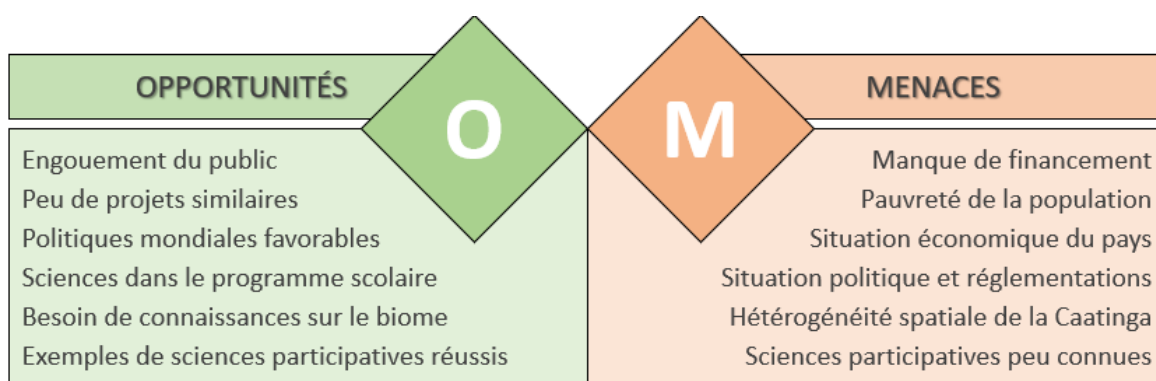


Figure 3.2 : Analyse des opportunités et des menaces pour l’implantation d’un programme de science participative dans la Caatinga.

La prise de conscience environnementale, à l’échelle mondiale, a conduit à la mise en place de politiques favorisant de plus en plus les projets de suivi et d’adaptation aux changements climatiques (Farigoul, 2018). De plus, l’implication du public, touché et sensibilisé à la cause environnementale, a augmenté fortement ces dernières années. Ce dernier point, plus présent en Europe et en Amérique du Nord (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Delmas, 2019), commence à se manifester aussi dans les pays d’Amérique du Sud (Massarani, 2012). La valorisation des sciences dans le programme scolaire favorise cet état d’esprit avec l’accroissement des connaissances dans ce domaine et un intérêt grandissant des élèves pour les thématiques scientifiques (Haklay, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Ces circonstances créent un climat favorable au développement d’un programme de sciences participatives pour le suivi des changements climatiques. Par ailleurs, les programmes de sciences participatives similaires existants et mis en place dans différents pays montrent de bons taux de réussite et permettent d’ores et déjà d’en tirer des conclusions, de s’en inspirer tout en tenant compte de leurs apprentissages et de valoriser le

processus de participation conjointe des citoyens et des scientifiques (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; LERU, 2016). De plus, le fait qu'il existe actuellement peu de projets semblables au Brésil peut être un atout. Si le projet est réfléchi puis valorisé, il peut être un point de départ intéressant permettant le suivi des changements climatiques. L'implantation du programme *Sentinelas* participerait en effet à combler le manque de connaissances actuel des écosystèmes de la Caatinga et à obtenir des données à grande échelle et à long terme (Magrin et al., 2014; Kobori et al., 2016; Silva et al., 2017). Si le projet est une réussite, il pourrait donc être adapté pour être mis en place dans d'autres biomes, avec des impacts positifs autant au niveau de la sensibilisation des citoyens que de la collecte de données (Bonney, Cooper, et al., 2009; Couvet et Teyssède, 2013). Une autre force de l'association des scientifiques et des citoyens dans un tel programme est l'économie pouvant être réalisée lors de la prise des données, les participants bénévoles permettant la collecte d'observations en plus grande quantité sur un vaste territoire. Ceci ne serait pas possible, notamment financièrement, si seulement des scientifiques étaient mandatés pour le faire (Conrad et Hilchey, 2011; LERU, 2016).

Malgré ces nombreuses opportunités, plusieurs menaces existent et doivent être prises en compte pour le développement du programme *Sentinelas*. Premièrement, l'hétérogénéité spatiale des écosystèmes de la Caatinga (Silva et al., 2017) rend le programme plus complexe à élaborer et à mettre en place. En effet, le programme doit être assez englobant pour couvrir l'étendue du biome. Par exemple, les espèces indicatrices choisies doivent se retrouver sur la totalité du territoire ou plusieurs espèces doivent être présentées pour les différentes écorégions, afin d'offrir un certain nombre d'options aux participants. Deuxièmement, un des points importants pour motiver les gens aux sciences participatives est l'intérêt qu'ils portent aux sciences et à la recherche, lié notamment à l'apprentissage de celles-ci dans leur cursus scolaire et la possibilité d'avoir du temps libre pour avoir des activités à l'extérieur de leur temps de travail (Haklay, 2013; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Dans la Caatinga, étant donné la pauvreté générale (Leal et al., 2005; Marengo, 2008; IBGE, 2019), les temps libres sont moins nombreux, ce qui peut être un frein au développement des sciences participatives. Cet aspect est cependant moins limitant concernant les jeunes, qui ont plus de temps libre que leurs aînés. Troisièmement, la situation politique et économique actuelle du Brésil n'est pas particulièrement favorable aux projets à portée environnementale (Carneiro et

Blanc, 2018; Pereira et Rovere, 2019). En effet, les décisions politiques et les réglementations en vigueur ne valorisent pas la protection des écosystèmes (Blanc et Carneiro, 2018; Raimbert, 2018; Pereira et Rovere, 2019) et les financements pour les projets environnementaux ne sont pas faciles à obtenir (Carneiro et Blanc, 2018; Meeus, 2019).

Relativement au programme en lui-même, une des menaces les plus importantes réside dans le simple fait que les sciences participatives, phénomène relativement bien développé en Europe et en Amérique du Nord (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016), sont encore peu explorées en Amérique du Sud et plus particulièrement au Brésil. Cette méconnaissance des sciences participatives ne facilite pas l'adhésion des participants et des scientifiques aux projets et un travail de promotion important doit être fait en amont. Par exemple, dans le premier chapitre, il a été évoqué que certains termes utilisés pour qualifier les sciences participatives peuvent occasionner des incompréhensions (Silvertown, 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Dai et al., 2018). De ce fait, il est nécessaire de prendre le temps de choisir la meilleure façon de valoriser et promouvoir le projet. De plus, les objectifs et les questions de recherche sont habituellement construites en collaboration avec les différentes parties prenantes (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Un des éléments manquant dans cet essai est la multidisciplinarité et la communication avec les différents acteurs. Si un tel projet était amené à voir le jour, il serait donc essentiel de revoir, avec les différents partenaires, et adapter au besoin le processus et les étapes qui seront décrites plus loin dans ce document. La difficulté à rassembler les différents partenaires et les fonds nécessaires à la réalisation d'un projet d'une telle ampleur sont également des points de faiblesse notables. Houllier et Merilhou-Goudard (2016) expliquent qu'il faut du temps, une bonne préparation ainsi que du financement pour mettre en place des projets de sciences participatives en milieu scolaire. En effet, ce type de projets nécessitent généralement un minimum de deux ans de préparation et demandent un investissement de plusieurs dizaines de milliers de dollars au départ (Silvertown, 2009; Muséum national d'Histoire naturelle, 2019; Tela Botanica, 2019).

3.1.2 Choix de la communauté cible du programme de sciences participatives

Selon Krasilchik (2008) et Massarani (2012), pour atteindre une appropriation sociale des sciences, il est fondamental d'impliquer le public pour qu'il se sente concerné et écouté. En ce sens, enseigner

les sciences dans le cadre scolaire permet de former des jeunes qui seront plus tard capables de s'engager et de participer à la prise de décisions (Praia, Gil-Pérez et Vilches, 2007). Au Brésil, les sciences sont incluses dans le programme d'enseignement, notamment pendant les années obligatoires de l'enseignement fondamental, de 6 à 15 ans (Ministério da Educação, 2018). Le Tableau 3.2 présente les différents niveaux scolaires au Brésil, de 3 à 18 ans. La comparaison avec le système québécois sert principalement de repère.

Tableau 3.2 : Distinction entre le système éducatif brésilien et québécois au niveau de l'enseignement maternel, primaire et secondaire. Le cadre rouge indique la période priorisée dans le cadre du programme *Sentinelas*.

Âge	Brésil	Québec
3-4 ans	Éducation infantile	Pré-maternelle
4-5 ans		
5-6 ans		Maternelle
6-7 ans	Enseignement fondamental 1	École primaire
7-8 ans		
8-9 ans		
9-10 ans		
10-11 ans		
11-12 ans	Enseignement fondamental 2	Secondaire (1 à 5)
12-13 ans		
13-14 ans		
14-15 ans		
15-16 ans	Enseignement moyen	Cégep
16-17 ans		
17-18 ans		
18-19 ans		

Inspiré de : Ministério da Educação, (2018); Ministère Immigration, Diversité et Inclusion Québec, (2018) et Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur Québec, (2019)

En partant du principe que les jeunes souhaitent faire partie de la solution aux problèmes des changements climatiques (Tolentino Neto, 2008; Massarani, 2012), de plus en plus de projets sont orientés vers eux, comme CEnáRIOS et *Mudanças climáticas: um debate para os futuros cidadãos* (Massarani, 2012). Dans ces deux cas, des jeunes ont présentés des projets, discuté entre eux et ont

pu échanger et poser des questions à des experts dans le domaine. Cependant, ces projets sont plus souvent mis en place par des musées et peu d'entre eux sont développés directement dans les écoles, en collaboration avec les professeurs (Massarani, 2012).

Or, il est intéressant de faire des projets de sciences participatives avec des élèves (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). En effet, en plus de les intéresser à l'environnement de la Caatinga et à découvrir les sciences participatives, ces jeunes ont bien plus de temps libre que leurs aînés. De plus, les élèves sont dans un processus d'apprentissage, ce qui en fait un public réceptif et accessible. Le milieu scolaire est donc très intéressant pour développer le programme *Sentinelas* :

- Le cadre déjà existant facilite la mise en place du programme ;
- Il permet de rejoindre un nombre important de personnes, notamment des jeunes, qui sont les citoyens et décideurs de demain ;
- Il a un intérêt pour le recrutement et la rétention des participants (LERU, 2016) car une fois le programme bien implanté, les élèves le suivent sur plusieurs années consécutives ;
- Les écoles peuvent fonctionner de manière indépendante (chaque classe participante prend ses mesures et fait son suivi) ou conjointe (regroupement de classes ou même d'écoles pour des ateliers communs, par exemple).

Le programme *Sentinelas* vise les élèves de 11 à 15 ans et leurs professeurs en raison principalement du fait que l'enseignement fondamental (6 à 15 ans) est obligatoire (Ministério da Educação, 2018), rendant le programme accessible à tous. De plus, les élèves de 11 à 15 ans ont déjà acquis des bases en sciences, facilitant l'implantation du processus scientifique nécessaire à la collecte des données. Ce programme permet des actions locales, dans différents établissements scolaires, encadrées et coordonnées à l'échelle de la Caatinga pour obtenir un impact global. Les principaux défis sont de réussir à bien intégrer le programme de science participative aux temps d'activités scolaires, de parvenir à inclure et engager les professeurs puis les élèves ainsi que de mobiliser les différents acteurs (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). À long terme, si le programme est une réussite, il pourrait être intéressant de l'étendre à tout l'enseignement fondamental, impliquant ainsi les jeunes durant une grande partie de leur scolarité.

3.1.3 Structure du programme

La structure du programme de science participative est très importante (Haklay, 2013). En effet, intégrer la participation des citoyens à la science peut avoir des effets cumulatifs, positifs et mesurables sur la biodiversité (Cooper et al., 2007) à condition d'être encadré convenablement (Silvertown, 2009; Haklay, 2013). Dans le cadre du programme *Sentinelas*, pour être rigoureux scientifiquement tout en incorporant des participants, il est nécessaire de mettre en place un cadre structuré valorisant les données plus que les opinions des différents acteurs (Haklay, 2013). Les instructions et informations doivent être simples, uniformes (Silvertown, 2009) et en portugais pour faciliter l'accès et les échanges entre les différents partenaires du projet, notamment les élèves. Les critères d'élaboration du programme *Sentinelas* sont présentés dans le Tableau 3.3 et sont détaillés dans les parties subséquentes.

Tableau 3.3 : Critères d'élaboration du programme de science participative *Sentinelas*

Points importants	Application au programme <i>Sentinelas</i>
Parties prenantes <ul style="list-style-type: none"> Public visé Rôles des participants Formes d'engagement 	Formes d'engagement : essentiellement scolaire, collectif et non rémunéré (pour les élèves), pouvant aller de 1 à 4 ans. Les parties prenantes et leurs rôles sont présentées dans les parties 3.1.2 et 3.2.1
Objectifs <ul style="list-style-type: none"> Clairs, précis, simples Mesurables Compréhensibles et acceptés par toutes les parties prenantes Réalistes 	Dans le cadre du programme, les objectifs doivent être un compromis entre les intérêts éducatifs et scientifiques. Les objectifs scientifiques, d'éducation et de sensibilisation sont définis dans la partie 3.1.4
Hypothèses / Questions de recherche <ul style="list-style-type: none"> Scientifiques Orientent la prise de données 	Exemples d'hypothèses : - Les changements dans les patrons de précipitation vont entraîner la diminution de l'aire de répartition de l'espèce X. - Le taux de survie de l'espèce Y va diminuer avec l'augmentation de la fréquence des sécheresses. - La réduction de la saison des pluies entraînera une perte hâtive des feuilles des espèces arbustives. Exemples de questions : - Comment l'espèce Z est distribuée à la suite de l'augmentation de la durée des sécheresses ? - Comment l'espèce X réagit à la diminution de la durée de la saison des pluies ? Des questions plus précises à certaines espèces de la Caatinga sont présentées au début de la partie 3.2

Tableau 3.3 : Points importants pour la structure du programme de science participative et application au programme *Sentinelas* (Suite)

Points importants	Application au programme <i>Sentinelas</i>
Prise des données <ul style="list-style-type: none"> • Quoi ? • Quand ? • Où ? • Comment ? 	<p>La période de prise de données, le lieu et les méthodes de mesures dépendent principalement des variables sélectionnées et des saisons.</p> <p>Les protocoles sont un élément essentiel car ils permettent aux participants de bien comprendre les tâches à effectuer et de réaliser la collecte de données de manière optimale. Des protocoles correctement élaborés et faciles à suivre permettent de limiter les biais dans la prise de données.</p> <p>La partie 3.2.2 détaille les différents éléments importants à prendre en compte.</p>
Protocoles <ul style="list-style-type: none"> • Rigoureux et précis • Standardisés / uniformes • Simples et faciles à suivre 	
Validation des données <ul style="list-style-type: none"> • « Test » d'entraînement pour les participants avant la prise de données • Vérification et analyse rigoureuse des données collectées • Réduction des erreurs (programmes informatiques, algorithmes, traitements statistiques) 	<p>L'entraînement des participants peut se faire par le biais de vidéos explicatives, de documents imprimés ou encore sous forme d'un jeu sur une application ou sur le site internet (si la prise de données se fait aussi sur l'application ou le site par exemple).</p> <p>Le traitement statistique des données permet de prendre en compte et de corriger les erreurs et les différences entre les résultats, liées à l'hétérogénéité des observateurs.</p> <p>En ce qui concerne la propriété des données brutes collectées, il est souvent proposé aux participants une charte éthique qui permet par la suite de publier librement les données. Dans l'éventualité où le programme <i>Sentinelas</i> rentrerait dans le programme scolaire brésilien il pourrait y avoir des accords différents.</p> <p>La partie 3.2.3 explique plus en détail ces différents aspects.</p>
Utilisation des données <ul style="list-style-type: none"> • Poursuite des objectifs • Respect des différents acteurs • Reconnaissance du travail des participants • Propriété des données 	
Présentation des données et communication <ul style="list-style-type: none"> • Retours personnalisés pour les participants • Vulgarisation des résultats • Publication d'articles scientifiques 	<p>Permettre aux participants de voir leur contribution personnelle au projet et vulgariser les résultats issus des données collectées pour renforcer positivement l'intérêt des participants (notamment les élèves et les professeurs) et favoriser la participation au programme à long terme.</p> <p>La partie 3.2.4 aborde la vulgarisation, la promotion et la divulgation des résultats.</p>

Inspiré de : Cooper et al., (2007); Wilderman, (2007); Silvertown, (2009); Mathieu, (2011); Haklay, (2013); Houllier et Merilhou-Goudard, (2016) et LERU, (2016)

La transparence du processus et des résultats ainsi que la prise en compte des commentaires faits par les participants sont aussi essentielles pour assurer la pérennité du programme (LERU, 2016). Les principales sources d'inspiration et de références pour structurer le programme *Sentinelas* sont l'Observatoire des Saisons (Tela Botanica, 2019), le *Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de*

Desastres Naturais (Cemaden, 2019a), Vigie-Nature (Muséum national d'Histoire naturelle, 2019) et le Centre de Recherches sur les Écosystèmes d'Altitude (CREA Mont-Blanc, 2019a, 2019b). Leurs programmes structurés, détaillés et attractifs, sont des références intéressantes pour le développement du programme *Sentinelas*. Les informations, explications et exemples présentés dans les parties subséquentes sont ainsi principalement inspirés de ces sources.

3.1.4 Objectifs scientifiques, d'éducation et de sensibilisation

La biodiversité, les services écosystémiques, les activités commerciales, le développement économique de la région et les changements climatiques sont interdépendants dans le biome de la Caatinga (Silva et al., 2017). Une transition durable doit donc être basée sur une approche écosystémique permettant d'englober ces différents aspects (Silva et al., 2017). Les changements observés et prévus au niveau des températures et des précipitations ont, et auront fort probablement, des répercussions importantes sur la phénologie, les écosystèmes et la biodiversité de la Caatinga (Araujo et Rahbek, 2006; Loyola et al., 2012; Souza et al., 2016; Zanin et al., 2017). L'aggravation des conditions rendent également ce biome plus enclin à la désertification et ainsi davantage sensible aux changements climatiques (Marengo, 2008; Souza et Oyama, 2011; Silva et al., 2017). Dans ce contexte, l'obtention de données scientifiques fiables sur l'ensemble de la Caatinga est souhaitable pour faciliter l'anticipation et l'adaptation. De plus, au vu des activités humaines et de leurs impacts sur l'environnement (Schnell, 1966; Leal et al., 2003; Almeida-Cortez et al., 2016b; Salvatierra et al., 2017; Silva et al., 2017), aggravant l'état général de la Caatinga, il devient impératif d'éduquer et de sensibiliser, pour espérer avoir un impact sur les habitudes de la population.

Les principales questions à la base de ce projet sont :

- Comment les changements climatiques affectent-ils les écosystèmes de la Caatinga, à court, moyen et long terme ?
- Comment peut-on mobiliser et impliquer durablement la population sur la question de la préservation de la Caatinga en contexte de changements climatiques ?

L'objectif principal du programme *Sentinelas* est donc d'allier science et éducation pour effectuer le suivi des changements climatiques à l'échelle de la Caatinga.

Les sous-objectifs scientifiques du programme sont :

- Mesurer l'impact des changements climatiques sur la flore et la faune de la Caatinga ;
- Acquérir plus de connaissances et de données rigoureuses scientifiquement ;
- Assurer des observations à long terme et sur l'ensemble du biome.

Les sous-objectifs de sensibilisation et d'éducation sont :

- Conscientiser, mobiliser et impliquer les jeunes sur les enjeux climatiques ;
- Valoriser l'approche scientifique auprès des jeunes ;
- Diminuer l'écart existant entre le milieu scientifique et la population.

3.2 Principales étapes de mise en place et de suivi du programme *Sentinelas*

Bonney, Cooper, et al. (2009) et Bonney, Ballard, et al. (2009) présentent plusieurs étapes à suivre pour la mise en place et le suivi de programmes de sciences participatives, qui servent de référence pour l'élaboration du programme *Sentinelas* :

1. Choisir une ou des questions scientifiques et rassembler de l'information ;
2. Former une équipe de scientifiques, éducateurs, techniciens et évaluateurs ;
3. Développer et tester des protocoles et du matériel pédagogique ;
4. Recruter des participants ;
5. Entraîner les participants ;
6. Collecter et vérifier les données ;
7. Analyser et interpréter les données ;
8. Diffuser les résultats ;
9. Mesurer les impacts du programme et ajuster au besoin.

Dans le cadre du programme *Sentinelas*, comme dans tout projet de science participative, il est donc indispensable d'examiner dès le départ quelles questions scientifiques peuvent être posées en tenant compte de la possibilité de collectes de données et la capacité de mobiliser et de former les participants (Haklay, 2013). Plusieurs questions concrètes, principalement concernant des espèces végétales de la Caatinga, sont proposées pour ce programme :

- La réduction de la saison pluies entrainera-t-elle une perte hâtive des feuilles de *Myracrodruon urundeuva*, *Amburana cearensis*, *Ziziphus joazeiro*, *Tabebuia aurea*, *Spondias tuberosa* et *Schinopsis brasiliensis* ? Ces espèces ligneuses sont sélectionnées car ce sont des espèces indigènes du Brésil dont l'aire de répartition se retrouve principalement dans la Caatinga et couvre une grande partie de ce biome.
- Les périodes et durées de floraison et fructification vont-elles changer pour ces espèces ?
- Le taux de reproduction d'*Anodorhynchus leari*, *Eupsittula cactorum*, *Rhinella granulosa* et *Callithrix jacchus* va-t-il diminuer avec l'augmentation de la fréquence des sécheresses ?
- L'aire de distribution de ces espèces animales et végétales va-t-elle changer ?

Cette liste pourrait être modifiée ou complétée ultérieurement, à la suite de discussions avec les différents partenaires par exemple (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

3.2.1 Les parties prenantes

Lier pédagogie et recherche n'est pas une chose facile à faire et à maintenir dans le temps. Le choix de partenaires doit donc être fait de manière judicieuse et réfléchie, en fonction notamment des objectifs du projet (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; LERU, 2016). Bien qu'il soit intéressant d'avoir plusieurs partenaires, la multiplication des parties prenantes peut être un frein au développement et à l'établissement du programme (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Il faut prévoir du temps, lors de la phase de démarrage mais également pendant tout le processus, pour apprendre à connaître puis rencontrer périodiquement les partenaires pour faire des ajustements au besoin (Chlous, 2016). Ceci est aussi nécessaire pour bien définir les enjeux et mettre en place une vraie médiation permettant un dialogue continu et un partenariat durable (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Il est intéressant d'avoir une certaine diversité d'acteurs, du monde de la recherche et de l'éducation, pour varier les approches et les points de vue (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; LERU, 2016). L'implication des parties prenantes en amont du projet, ou du moins le plus tôt possible, permet de s'assurer que tous se sentent concernés, écoutés et respectés. Ce dernier point est primordial pour que l'implantation et le suivi du projet se déroulent aussi bien que possible (Chlous, 2016; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Le programme *Sentinelas* doit s'appuyer sur des partenaires motivés et impliqués. Étant donné qu'il a pour objectif de s'implémenter dans le système scolaire, il est essentiel que le Ministère de l'éducation brésilien soit un élément moteur du projet (Ministério da Educação, 2018). Les enseignants sont également des acteurs de première ligne car ce sont eux qui garantissent le succès du programme en le mettant en place dans leurs classes. Les élèves, directement concernés, sont aussi des éléments forts et doivent être impliqués pour leur donner la possibilité de s'approprier le projet. Concernant la mise en place concrète du programme, le *Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais* (Cemaden) est un organisme de référence intéressant qui propose déjà de nombreuses activités pédagogiques en milieu scolaire, notamment pour la surveillance des catastrophes naturelles (Cemaden, 2019c).

3.2.2 Choix des variables et développement de protocoles

En contexte de changements climatiques, plusieurs variables sont souvent utilisées pour quantifier les changements, notamment la température, la pluviométrie, la durée des saisons ou encore la présence/absence d'espèces indicatrices (Marengo, 2008; Magrin et al., 2014; Pinheiro et al., 2017; Silva et al., 2017; Tela Botanica, 2019). Elles ont un impact direct sur la dynamique des écosystèmes. Par exemple, les variations temporelles de la feuillaison, de la floraison et de la fructification des espèces végétales dans la Caatinga, liées à l'alternance de la saison sèche et de la saison des pluies, influencent la pollinisation, la dispersion des graines et l'organisation des communautés animales et végétales (Leal et al., 2003). Un changement important de la durée ou de la période des saisons peut altérer ces processus et avoir un impact sur toute la chaîne alimentaire (Leal et al., 2003; Silva et al., 2017). Ces variables sont donc des outils d'analyse mais également de concertation et d'aide à la décision (Couvét et Teyssèdre, 2013). En effet, mieux connaître les changements en cours et estimer ceux prévus permet à la fois d'anticiper et de s'adapter (Silva et al., 2017).

Suite au choix des variables, un ou plusieurs protocoles simples, clairs et précis sont développés pour permettre aux participants de suivre facilement une démarche scientifique (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; CREA Mont-Blanc, 2019b; Muséum national d'Histoire naturelle, 2019; Tela Botanica, 2019). Avant de le mettre en application, il est indispensable de vérifier la faisabilité et la viabilité d'un protocole pour minimiser le risque de biais liés à une mauvaise compréhension

des consignes (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). En effet, le protocole est le principal outil des différents participants.

Dans le cadre du programme *Sentinelas*, le suivi des saisons, réalisé grâce à l'observation d'espèces animales et végétales, peut permettre d'étudier à la fois les changements phénologiques et leurs impacts sur les espèces ciblées. Ces espèces sont principalement celles présentées avec les questions scientifiques, au début de la partie 3.2. Les protocoles développés pour l'ODS et le programme Phénoclim (CREA Mont-Blanc, 2019b; Tela Botanica, 2019), comme celui présenté en annexe 2, ainsi que des outils mis à disposition par le Cemaden (Cemaden, 2019c) sont de bonnes références. Dans les protocoles du programme *Sentinelas*, les différents points détaillés aux participants doivent être :

1. Le choix de la zone d'étude ;
2. Le choix des espèces à observer (parmi une liste préétablie) ;
3. Quand et comment effectuer les observations (en suivant des consignes précises et en s'aidant de documents, comme des exercices d'entraînement, des fiches d'identification des espèces et des stades, des fiches et tableaux d'observation à remplir, etc.) ;
4. Comment enregistrer les observations (souvent dans un espace personnel sur un site internet ou une application ou, plus rarement, en version papier).

Des exemples de documents d'aide pour les participants comme des fiches d'identification et des tableaux d'observations sont également présentés en annexe 3.

3.2.3 Gestion et analyse des données

La récolte, puis la gestion des données sont des points clés pour limiter au maximum les biais (Gosselin et al., 2010; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). En effet, la prise de données par un grand nombre de participants entraîne nécessairement des erreurs, associées à l'hétérogénéité et à la quantité d'observateurs (Gosselin et al., 2010; Haklay, 2013). La limitation de ces erreurs et leur correction tout au long du processus est donc nécessaire. En amont de la prise de données, il est indispensable de transmettre des outils aux participants qui leur permettent de s'entraîner, limitant ainsi les erreurs à la source (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Cemaden, 2019c; Tela Botanica, 2019). Ceci permet également aux scientifiques d'appliquer, plus tard dans le processus, des

corrections sur les données en se basant sur les résultats obtenus et le taux d'erreurs observé durant les tests (Bonney et al., 2009; Haklay, 2013). Cette préparation à la collecte de données peut se faire à partir de documents ou vidéos explicatives, d'exercices d'entraînement (exemples en annexe 4), de jeux ludiques sur les téléphones cellulaires ou l'ordinateur ou d'une combinaison de ces différents éléments (Bonney, et al., 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Comme mentionné précédemment, des protocoles clairs, précis et vulgarisés doivent être mis en place pour limiter les erreurs lors de la prise de données (Cohn, 2008). Puis lors de la récupération des données par les scientifiques, celles-ci sont vérifiées et analysées. Là encore tout est fait pour réduire les biais au maximum, notamment grâce aux outils informatiques actuels, comme les programmes d'analyse statistique (Bonney et al., 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Le programme *Sentinelas* visant l'ensemble de la Caatinga, il faut prendre en compte que le territoire couvert est vaste et que ce projet doit impliquer de nombreux participants. La récupération, la validation et l'utilisation des données sont des étapes cruciales et sensibles. Premièrement, il est essentiel de favoriser la collecte des données et d'encourager la participation en créant une base de données rendant accessible et facile la saisie des observations par les participants. En général, comme la grande majorité des jeunes possèdent maintenant des téléphones intelligents ou des ordinateurs, l'enregistrement des observations se fait via une application mobile ou un site internet (Cemaden, 2019a; CREA Mont-Blanc, 2019b; Muséum national d'Histoire naturelle, 2019; Tela Botanica, 2019). Deuxièmement, le traitement et l'analyse des données, réalisés dans un premier temps par les scientifiques, doit être globalement compris par les participants, étant donné la visée éducative du processus.

3.2.4 Vulgarisation, promotion et diffusion des résultats

Afin d'assurer la pérennité du programme, il est essentiel de tenir informées toutes les parties prenantes des avancées de la recherche (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; LERU, 2016). La production d'articles scientifiques, essentielle pour assurer la reconnaissance scientifique, n'est pas suffisante et il est nécessaire de vulgariser, pour rendre accessible les résultats au plus grand nombre. Les personnes impliquées, ou qui souhaitent simplement suivre l'évolution du programme, doivent pouvoir savoir ce qu'il advient des observations faites sur le terrain (Bonney, Cooper, et al.,

2009; Sullivan et al., 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Bonney et al. (2009) expliquent que les observations sont plus nombreuses quand les participants constatent concrètement leur contribution à la prise de données. Les retours individualisés et la valorisation personnalisée de la collaboration des participants favorisent leur participation et leur adhésion à long terme au programme (Sullivan et al., 2009). Néanmoins, la vulgarisation est un aspect qui doit aussi être traité en amont de la récolte des données. Elle doit être présente dès le début du projet et même avant la mise en place du programme (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016; Dai et al., 2018). Elle permet de faire la promotion de celui-ci, d'organiser la participation du public et de divulguer efficacement les informations auprès des différents partenaires, notamment les participants (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Le retour d'information, principalement réalisé par les scientifiques impliqués dans le programme, doit donc être fréquent et accessible par les « non scientifiques ». Les nouvelles technologies, maintenant amplement répandues, facilitent la diffusion de l'information (Dai et al., 2018). En général, les projets de sciences participatives utilisent des sites internet, les réseaux sociaux et des applications pour diffuser leurs messages et promouvoir leur travail (Dai et al., 2018; Cemaden, 2019a; CREA Mont-Blanc, 2019b; Tela Botanica, 2019).

Concernant le programme *Sentinelas*, cet aspect de vulgarisation et de diffusion est fondamental étant donné le peu de projets de sciences participatives actuellement développés au Brésil. Un travail de promotion en amont est nécessaire pour expliquer et valoriser le projet et convaincre de son intérêt et de son utilité à moyen et long terme. Tout au long du projet il est essentiel de former, de suivre et de soutenir les élèves mais également les enseignants pour encourager l'adhésion au programme et maintenir la motivation et l'implication dans le temps (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Développer un site internet pour regrouper les informations et une application pour rentrer les observations et suivre l'évolution personnel et collective de la prise de données est un premier pas dans cette direction. L'utilisation des réseaux sociaux, principalement dans un but de diffusion et de sensibilisation, doit également être considérée et réfléchie pour assurer une transmission adéquate et efficace des messages en amont et pendant le projet. Dans le cadre de ce programme Il peut également être envisagé de mettre à contribution les élèves, en leur permettant de publier eux-mêmes du contenu relatif au projet, par exemple.

3.3 Une vision à long terme

Afin de développer une vision à long terme du programme *Sentinelas*, il est pertinent d'avoir un aperçu d'ensemble de celui-ci. La Figure 3.3 résume donc le programme *Sentinelas* et met en avant les liens entre les différentes parties abordées dans le cadre de l'essai, soit les sciences participatives, la Caatinga et la mise en place d'un programme durable.

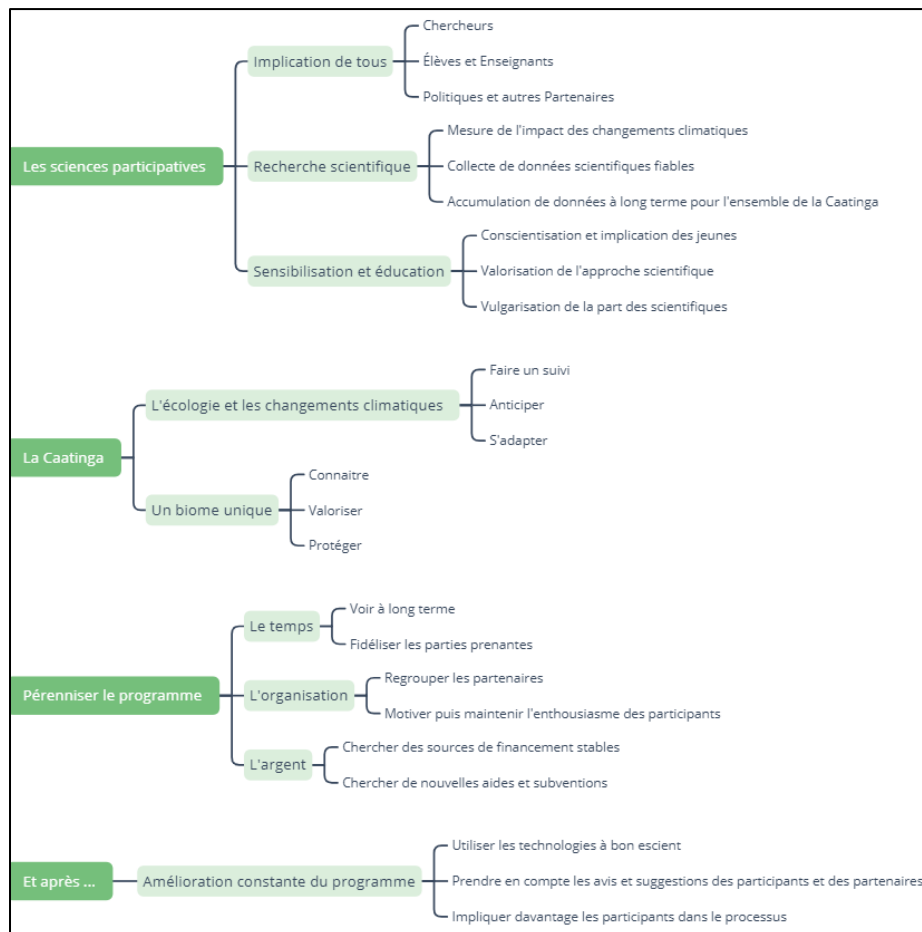


Figure 3.3 : Résumé du programme *Sentinelas*.

Comme expliqué précédemment, envisager une collaboration plus étendue avec les élèves et les enseignants peut permettre de poursuivre et même d'aller au-delà des objectifs actuels, à la fois scientifiques et éducatifs. À long terme, une plus grande participation des étudiants dans la formulation des questions de recherche, le traitement et l'analyse des données et la vulgarisation

et la diffusion des résultats peut être envisagée (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). L'utilisation poussée de la technologie pour encourager la participation est un atout, en développant par exemple une application sous forme de jeux avec des objectifs, des étapes et des points à gagner. Élargir le public ciblé, en intégrant des habitants par exemple, peut également être un point d'amélioration. Pour ce faire, le projet doit déjà être reconnu et soutenu. La Figure 3.4 résume différentes notions en six recommandations, pour permettre de pérenniser le programme.

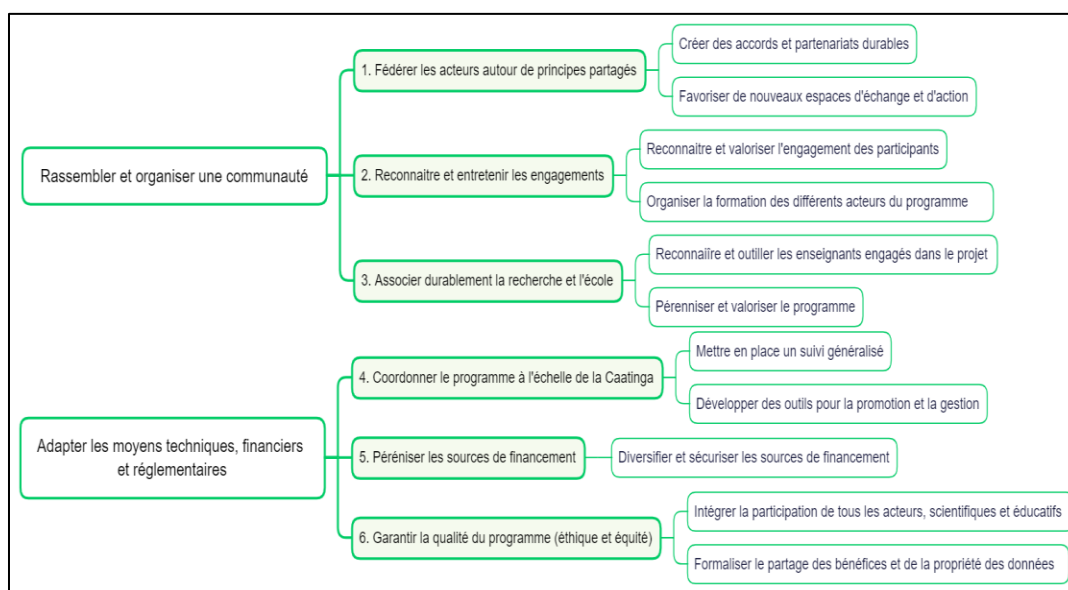


Figure 3.4 : Recommandations pour pérenniser le programme *Sentinelas*.

Inspiré de : Houllier et Merilhou-Goudard, (2016)

En plus des différents points mentionnés, une vision à long terme implique l'évaluation et l'amélioration constante du programme (Bonney, Cooper, et al., 2009; LERU, 2016). L'évaluation porte principalement sur la conduite du projet, le respect des objectifs, l'implication des partenaires et des participants, l'impact des recherches effectuées et les bénéfices pour chacune des parties prenantes (Bonney et al., 2009; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Des indicateurs clairs et précis doivent être utilisés pour l'évaluation comme par exemples le nombre d'articles scientifiques publiés, le nombre de visites recensé sur le site internet, le nombre de participants par année ou la durée d'implication des participants (Bonney et al., 2009). S'assurer que les objectifs scientifiques et éducatifs ont été atteints, mettre en avant les succès et analyser les erreurs permettent de bonifier le programme et de mieux concevoir les futurs projets (Bonney et al., 2009).

Conclusion

La Caatinga, forêt tropicale saisonnière sèche du Brésil, est un biome d'exception. Elle regroupe des écosystèmes hétérogènes abritant une faune et une flore spécifique et de nombreuses espèces endémiques. Cependant, cette richesse est actuellement affectée et menacée par les changements climatiques. De plus, les activités anthropiques, notamment l'agriculture, l'élevage et l'exploitation forestière, accentuent et accélèrent la dégradation du biome. Or, le manque de connaissances et de données scientifiques concernant la Caatinga limite la compréhension des changements en cours et de leurs répercussions à moyen et long terme. Il est donc aujourd'hui indispensable d'agir à deux niveaux : la collecte de données scientifiques fiables pour la globalité de la Caatinga ainsi que l'éducation et la conscientisation de la population aux réalités des changements climatiques et à ses impacts. C'est dans cet optique que s'inscrit le présent document.

L'approche proposée dans cet essai était l'utilisation des sciences participatives, qui consiste à intégrer les citoyens dans les activités de recherches scientifiques, pour effectuer un suivi des changements climatiques. En effet, les sciences participatives représentent un moyen efficace pour cumuler la prise de données à grande échelle et à long terme avec la sensibilisation des participants. Elles sont aujourd'hui en plein essor et de nombreux programmes démontrent avec succès les bénéfices de la collaboration des citoyens et des scientifiques pour la résolution de problèmes complexes, notamment relatifs à l'environnement.

L'objectif principal était de déterminer les composantes fondamentales nécessaires à la mise en place d'un programme de sciences participatives (le programme *Sentinelas*) pour le suivi des changements climatiques dans la Caatinga. Certaines notions importantes ont été considérées, notamment la situation politique et économique du Brésil et le contexte social, culturel et écologique de ce biome. En effet, l'implantation d'un programme de sciences participatives est un projet innovant répondant aux enjeux de la lutte et de l'adaptation aux changements climatiques. Cependant, il prend place dans un milieu écologiquement hétérogène et économiquement pauvre, avec un gouvernement peu enclin actuellement au développement et à la valorisation de projets environnementaux.

L'utilisation des concepts de sciences participatives combinés à la prise en compte des particularités de la Caatinga ont permis de présenter la structure générale, les objectifs scientifiques et éducatifs ainsi que les étapes nécessaires à la mise en place du programme *Sentinelas*. Les participants ciblés par ce programme sont les élèves de l'enseignement fondamental 2 au Brésil, c'est-à-dire des jeunes de 11 à 14 ans, accompagnés par leurs professeurs et supervisés par des scientifiques. Leur implication concrète dans la démarche leur donne plus de pouvoir d'action et de décision dans un domaine qui les touche directement, tout en permettant de répondre aux besoins et préoccupations actuelles concernant les changements climatiques pour le biome de la Caatinga.

Finalement, cet essai amène une base solide pour toute personne, ou groupe, souhaitant développer et mettre en place concrètement un programme de sciences participatives à l'échelle de la Caatinga. Les prochaines étapes à prendre en compte sont le rassemblement d'une équipe et de partenaires motivés et engagés dans le projet, la vérification de l'intérêt et du soutien du Ministère de l'éducation brésilien pour inclure le programme de sciences participatives dans le programme scolaire et l'établissement des protocoles scientifiques. En parallèle, il serait important de commencer la promotion du projet dans le milieu scolaire. Dans un premier temps, il peut être intéressant de sélectionner certaines écoles pour l'établissement d'un projet pilote sur une ou quelques années afin de tester le processus, les protocoles, la fiabilité des données récoltées, etc.

Références

- Albuquerque, U. P. de, Araújo, T. A. de S., Ramos, M. A., Nascimento, V. T. do, Lucena, R. F. P. de, Monteiro, J. M., ... Araújo, E. de L. (2008). How ethnobotany can aid biodiversity conservation: reflections on investigations in the semi-arid region of NE Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 18(1), 127-150. doi:10.1007/s10531-008-9463-8
- Albuquerque, U. P. (2006). Re-examining hypotheses concerning the use and knowledge of medicinal plants: a study in the Caatinga vegetation of NE Brazil. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2(1), 30.
- Aliaga, F., Durocher, A. et Johnson, S. (2019). Foldit : Solve Puzzles for Science. Repéré à <https://fold.it/portal/>
- Almeida-Cortez, J. S. de, Tavares, F. M., Schulz, K., Pereira, R. de C. A. et Cierjacks, A. (2016a). Floristic survey of the caatinga in areas with different grazing intensities, Pernambuco, Northeast Brazil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 1(1), 43. doi:10.24221/jeap.1.1.2016.986.43-51
- Almeida-Cortez, J. S. de, Tavares, F. M., Schulz, K., Pereira, R. de C. A. et Cierjacks, A. (2016b). Floristic survey of the caatinga in areas with different grazing intensities, Pernambuco, Northeast Brazil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 1(1), 43. doi:10.24221/jeap.1.1.2016.986.43-51
- Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., de Carvalho, A. L., de Siqueira Pinto, A., Santiago, G. A. C. F., Ometto, J. P. H. B., ... de Sá Barretto Sampaio, E. V. (2016). Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, 360, 367-375. doi:10.1016/j.foreco.2015.10.001
- ANA. (2018). Mudanças climáticas e recursos hídricos. Agência Nacional de Águas [Capa]. Repéré à <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos>
- Aragão, J. R. V., Groenendijk, P. et Lisi, C. S. (2019). Dendrochronological potential of four neotropical dry-forest tree species: Climate-growth correlations in northeast Brazil. *Dendrochronologia*, 53, 5-16. doi:10.1016/j.dendro.2018.10.011
- Araújo, G. M. de. (2009). Matas ciliares da caatinga: florística, processo de germinação e sua importância na restauração de áreas degradadas.
- Araújo, E., de Castro, C. C. et de Albuquerque, U. P. (2007). Dynamics of Brazilian Caatinga—A review concerning the plants, environment and people. *Functional Ecosystems and communities*, 1(1), 15–28.

- Araujo, M. B. et Rahbek, C. (2006). How Does Climate Change Affect Biodiversity? *Science*, 313(5792), 1396-1397. doi:10.1126/science.1131758
- Araujo, M. M., Longhi, S. J., Barros, P. L. C. de et Brena, D. A. (2004). Caracterização da chuva de sementes, banco de sementes do solo e banco de plântulas em Floresta Estacional Decidua ripária Cachoeira do Sul, RS, Brasil.
- Arnan, X., Arcoverde, G. B., Pie, M. R., Ribeiro-Neto, J. D. et Leal, I. R. (2018). Increased anthropogenic disturbance and aridity reduce phylogenetic and functional diversity of ant communities in Caatinga dry forest. *Science of The Total Environment*, 631-632, 429-438. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.037
- ASA. (s.d.). P1MC: Programa Um Milhão de Cisternas. Repéré à <https://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc>
- Baracho, M. (2013). Programa Um Milhão de Cisternas leva água e melhora qualidade de vida da população do semiárido brasileiro. Repéré à <http://dssbr.org/site/experiencias/programa-um-milhao-de-cisternas-leva-agua-e-melhora-qualidade-de-vida-da-populacao-do-semiarido-brasileiro/>
- BBC. (2006). Radio 4: Citizen Science. Repéré à <http://www.bbc.co.uk/radio4/science/citizenscience.shtml>
- Belda, M., Holtanová, E., Halenka, T. et Kalvová, J. (2014). Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. *Climate Research*, 59(1), 1-13. doi:10.3354/cr01204
- Bellefontaine, R., Gaston, A. et Petrucci, Y. (1997). *Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches*. Food & Agriculture Org.
- Big Day Brasil. (2017). Big Day Brasil. Repéré à <http://bigdaybrasil.com.br/>
- BláBláLogia. (2018). *Descobrimos uma espécie nova - Pesquisei 1* | BláBláLogia. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=atn6pTQTXW0>
- Blanc, J. et Carneiro, M. S. (2018). Le Brésil et l'environnement au XXI^e siècle : déficit démocratique, carences environnementales. *Brésil(s). Sciences humaines et sociales*, (13). doi:10.4000/bresils.2551
- Bonney, R., Ballard, H., Jordan, R., McCallie, E., Phillips, T., Shirk, J. et Wilderman, C. C. (2009). *Public Participation in Scientific Research: Defining the Field and Assessing Its Potential for Informal Science Education*. A CAISE inquiry Group Report.
- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V. et Shirk, J. (2009). Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience*, 59(11), 977-984. doi:10.1525/bio.2009.59.11.9

- Bononi, L., Taketani, R. G., Souza, D. T., Moitinho, M. A., Kavamura, V. N. et Melo, I. S. (2018). Higher phylogenetic diversity prevents loss of functional diversity caused by successive drying and rewetting cycles. *Antonie van Leeuwenhoek*, 111(7), 1033–1045.
- Brightsmith, D. J., Stronza, A. et Holle, K. (2008). Ecotourism, conservation biology, and volunteer tourism: A mutually beneficial triumvirate. *Biological Conservation*, 141(11), 2832-2842. doi:10.1016/j.biocon.2008.08.020
- Carneiro, M. S. et Blanc, J. (2018). Le Brésil et l'environnement au XXI^e siècle : des relations sous tensions. *Brésil(s). Sciences humaines et sociales*, (1). doi:10.4000/bresils.2712
- Cavalcante, A. et Major, I. (2006). Invasion of Alien Plants in the Caatinga Biome. *Ambio*, 35(3), 141-143.
- Cemaden. (2019a). Cemaden Educação. Repéré à <http://educacao.cemaden.gov.br/>
- Cemaden. (2019b). Cemaden Educação. Repéré à <http://www.cemaden.gov.br/cemaden-educacao/>
- Cemaden. (2019c). Projetos Participativos – Cemaden [Ministério da ciência, tecnologia, inovações e comunicações]. Repéré à <http://www.cemaden.gov.br/categoria/projetos/projetosparticipativos/>
- Chlous, F. (2016). Méthodologie participative : négociations multiples et reconfigurations des relations entre partenaires. Ateliers cartographiques dans l'archipel des Marquises. *Participations*, 16(3), 67. doi:10.3917/parti.016.0067
- Cohn, J. P. (2008). Citizen Science: Can Volunteers Do Real Research? *BioScience*, 58(3), 192-197. doi:10.1641/B580303
- Comandulli, C., Vitos, M., Conquest, G., Altenbuchner, J., Stevens, M., Lewis, J. et Haklay, M. (2016). Ciência cidadã extrema: uma nova abordagem, 14.
- Conrad, C. C. et Hilchey, K. G. (2011). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1-4), 273-291. doi:10.1007/s10661-010-1582-5
- Cooper, C. B., Dickinson, J., Phillips, T. et Bonney, R. (2007). Citizen Science as a Tool for Conservation in Residential Ecosystems. *Ecology and Society*, 12(2). doi:10.5751/ES-02197-120211
- Couvet, D., Jiguet, F., Julliard, R., Levrel, H. et Teyssedre, A. (2008). Enhancing citizen contributions to biodiversity science and public policy. *Interdisciplinary Science Reviews*, 33(1), 95-103. doi:10.1179/030801808X260031

- Couvet, Denis, Devictor, V., Jiguet, F. et Julliard, R. (2011). Scientific contributions of extensive biodiversity monitoring. *Comptes Rendus Biologies*, 334(5-6), 370-377. doi:10.1016/j.crvi.2011.02.007
- Couvet, Denis et Teyssède, A. (2013). Sciences participatives et biodiversité : de l'exploration à la transformation des socio-écosystèmes. *Cahiers des Amériques latines*, (72-73), 49-64. doi:10.4000/cal.2792
- CREA Mont-Blanc. (2019a). ATLAS Mont-Blanc : Un massif sous la loupe des citoyens. Repéré à <https://www.atlasmontblanc.org/fr>
- CREA Mont-Blanc. (2019b). Phenoclim : Les sciences participatives en montagne. Repéré à <https://phenoclim.org/fr>
- Dai, Q., Shin, E. et Smith, C. (2018). *Open and inclusive collaboration in science: A framework* ([OECD Science, Technology and Industry Working Papers] n° 2018/07). doi:10.1787/2dbff737-en
- Danielsen, F., Burgess, N. D., Jensen, P. M. et Pirhofer-Walzl, K. (2010). Environmental monitoring: the scale and speed of implementation varies according to the degree of peoples involvement. *Journal of Applied Ecology*, 47(6), 1166-1168. doi:10.1111/j.1365-2664.2010.01874.x
- De Lima, J. R. (s.d.). Programa Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN-Brasil), 31.
- Delgado, A. et Åm, H. (2018). Experiments in interdisciplinarity: Responsible research and innovation and the public good. *PLOS Biology*, 16(3), e2003921. doi:10.1371/journal.pbio.2003921
- Delmas, A. (2019, 10 janvier). Sciences participatives et biodiversité : en net progrès. *Libération.fr*. Repéré à https://www.liberation.fr/france/2019/01/10/sciences-participatives-et-biodiversite-en-net-progres_1700999
- Dickinson, J. L., Shirk, J., Bonter, D., Bonney, R., Crain, R. L., Martin, J., ... Purcell, K. (2012). The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6), 291-297. doi:10.1890/110236
- Drumond, M. A., Kiill, L. H. P., Lima, P. C. F., de Oliveira, M. C., de Oliveira, V. R., de Albuquerque, S. G., ... Cavalcanti, J. (2000). Estratégias para o uso sustentável da biodiversidade da caatinga. *Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE)*.
- Dupre, L. et Micoud, A. (2007). Savoirs publics sur la nature et politiques publiques de l'environnement : rôle et place des naturalistes amateurs et des professionnels, 15.
- eBird Brasil. (2018). Global Big Day: 5 de maio de 2018. Repéré à <https://ebird.org/ebird/brasil/news/global-big-day-5-may-2018>

- EveryAware. (2019). AirProbe International Challenge. Repéré à <http://www.everyaware.eu/category/apic/>
- FAO (dir.). (2016). *Forests and agriculture: land-use challenges and opportunities*. Rome : FAO.
- Farigoul, S. (2018). Objectif de Développement Durable - Changements Climatiques. *Développement durable*. Repéré à <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/climate-change-2/>
- Ferreira de Souza, L. G. (2016). Caracterização do banco de sementes do solo como recurso para recuperação de mata ciliar em Floresta Tropical Sazonal Seca (Caatinga).
- G3E. (2019). Groupe d'éducation et d'écovigilance de l'eau. Programme « J'adopte un cours d'eau ». *Groupe d'éducation et d'écovigilance de l'eau*. Repéré à <https://www.g3e-wag.ca/programmes-de-surveillance/jadopte-un-cours-deau/>
- Gariglio, M. A., Sá Barretto Sampaio, E. V. de, Antônio Cestaro, L. et Yoshio Kageyama, P. (2010). *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga*. Brasília, DF : Serviço Florestal Brasileiro.
- Giulietti, A. M., Bocage Neta, A. L., Castro, A., Gamarra-Rojas, C. F. L., Sampaio, E., Virgínio, J. F., ... Barbosa, M. R. V. (2004). Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação*, 48–90.
- Gosselin, M., Gosselin, F. et Julliard, R. (2010). L'essor des sciences participatives pour le suivi de la biodiversité : intérêts et limites. *Sciences Eaux & Territoires*, 9.
- Grey, F. (2009). Viewpoint: The age of citizen cyberscience – CERN Courier. Repéré à <https://cerncourier.com/viewpoint-the-age-of-citizen-cyberscience/>
- Gürel, E. et Tat, M. (2017). SWOT analysis : a theoretical review. *Journal of International Social Research*, 10(51), 994-1006. doi:10.17719/jisr.2017.1832
- Haklay, M. (2013). Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation. Dans D. Sui, S. Elwood et M. Goodchild (dir.), *Crowdsourcing Geographic Knowledge* (p. 105-122). Dordrecht : Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-007-4587-2_7
- Haklay, M. (2018). *History, Trends and an Overview of Citizen Science, part 1*. Repéré à https://docs.wixstatic.com/ugd/a35257_c84ddb3bf3154d5a8f5c159d7f3a6721.pdf
- Hecker, S., Haklay, M., Bowser, A., Makuch, Z. et Vogel, J. (2018). *Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy*. UCL Press.
- Helms, M. M. et Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis – where are we now?: A review of academic research from the last decade. *Journal of Strategy and Management*, 3(3), 215-251. doi:10.1108/17554251011064837

- Holanda, F. S. R., Santos, L. G. da C., Santos, C. M. dos, Casado, A. P. B., Pedrotti, A. et Ribeiro, G. T. (2005). Riparian vegetation affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. *Revista Árvore*, 29(2), 327–336.
- Holling, C. S. (1998). Two Cultures of Ecology. *Conservation Ecology*, 2(2). doi:10.5751/ES-00045-020204
- Houllier, F. et Merilhou-Goudard, J.-B. (2016). *Les sciences participatives en France: Etats des lieux, bonnes pratiques et recommandations*. Repéré à <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/321785-853d8-resource-rapport-impression-sciences-participatives-fevrier-2016.html>
- Howe, J. (2006). The Rise of Crowdsourcing, (14), 5.
- IBGE. (2004). IBGE - Agência de Notícias. *IBGE - Agência de Notícias*. Repéré à <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/2013-agencia-de-noticias/releases/12789-asi-ibge-lanca-o-mapa-de-biomas-do-brasil-e-o-mapa-de-vegetacao-do-brasil-em-comemoracao-ao-dia-mundial-da-biodiversidade.html>
- IBGE. (2019). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. Repéré à <https://www.ibge.gov.br/>
- IMAS. (2019). Redmap. *Redmap*. Repéré à <http://www.redmap.org.au/>
- INPE. (2016). Sistema Brasileiro de Alerta Precoce contra Seca e Desertificação. Repéré à <http://sap.ccst.inpe.br/>
- INPE. (2017). INPE : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Repéré à <http://www.inpe.br/>
- INPE et CPTEC. (2019a). Proclima - Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Nordeste. Repéré à <http://proclima.cptec.inpe.br/>
- INPE et CPTEC. (2019b). Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hidricos. Repéré à <http://pmtcrh.cptec.inpe.br/congressos.shtml>
- INRA. (2015, 10 avril). Un film sur le projet Survivors. Repéré à <http://www.nancy.inra.fr%2FToutes-les-actualites%2Fsurvivors-concours-cgenial>
- INRA. (2016, 5 février). Projet « Survivors » : Des chercheurs en herbe ! Repéré à <http://www.nancy.inra.fr%2FToutes-les-actualites%2FProjet-Survivors-Des-chercheurs-en-herbe>
- INRA. (2019). INRA – Sciences et recherches participatives – Site de l’Institut National de la Recherche Agronomique consacré aux sciences et recherches participatives. *INRA - Sciences et recherches participatives*. Repéré à <https://sciencesparticipatives.inra.fr/>

- Insectarium de Montréal. (2019a). Mission monarque. *Espace pour la vie*. Repéré à <http://espacepurlavie.ca/mission-monarque>
- Insectarium de Montréal. (2019b). Monarque sans frontière. *Espace pour la vie*. Repéré à <http://espacepurlavie.ca/monarque-sans-frontiere>
- Instituto VerdeCoral. (2019). Programa Cidadão Cientista na Bahia: Instituto VerdeCoral. Repéré à <https://www.verdecoral.com.br/programa-cidadao-cientista-na-bahia/>
- IPCC (dir.). (2007). *Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2019). Intergovernmental Panel on Climate Change Reports. Repéré à <https://www.ipcc.ch/reports/>
- Iqbal, M. M., Kimutai, J., Knowles, T., Meza, F., Nedjraoui, D., Tena, F., ... Burrell, A. (2019). IPCC Special Report : Climate Change and Land. Chapter 3 : Desertification, 174.
- Irwin, Aisling. (2018). Efforts to engage the public in research are bigger and more diverse than ever. But how much more room is there to grow? *Nature*, 562(7728), 480–482.
- Irwin, Alan. (1995). *Citizen science : A study of people, expertise and sustainable development*. Routledge.
- Isnard-Dupuy, P. et Hennequin, P. (2019, 13 juillet). Fos-sur-Mer : un projet unique de science participative pour mesurer les pollutions industrielles. *Reporterre, le quotidien de l'écologie*. Repéré à <https://reporterre.net/Fos-sur-Mer-un-projet-unique-de-science-participative-pour-mesurer-les>
- Jambes, J.-P. (1990). Le recul de la forêt dans le Nordeste brésilien : l'exemple des Caatingas des Cariris Velhos. *Cahiers d'outre-mer*, 43(171), 219-238.
- Jondreville, C., Lemerrier, B., Joigneau-Guesnon, C., Louiset, R., Gascuel, C. et Roturier, C. (2018). Clés de sol : un projet de sciences participatives pour caractériser les sols et leurs fonctions, 50.
- Julliard, R. (2017). Science participative et suivi de la biodiversité : l'expérience Vigie-Nature. *Natures Sciences Sociétés*, 25(4), 412-417. doi:10.1051/nss/2018008

- Julliard, R., Jiguet, F. et Couvet, D. (2004). Common birds facing global changes: what makes a species at risk? *Global Change Biology*, 10(1), 148-154. doi:10.1111/j.1365-2486.2003.00723.x
- Kasecker, T. P., Ramos-Neto, M. B., da Silva, J. M. C. et Scarano, F. R. (2018). Ecosystem-based adaptation to climate change: defining hotspot municipalities for policy design and implementation in Brazil. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23(6), 981-993. doi:10.1007/s11027-017-9768-6
- Khatib, F., DiMaio, F., Cooper, S., Kazmierczyk, M., Gilski, M., Krzywda, S., ... Popović, Z. (2011). Crystal structure of a monomeric retroviral protease solved by protein folding game players. *Nature structural & molecular biology*, 18(10), 1175.
- Kobori, H., Dickinson, J. L., Washitani, I., Sakurai, R., Amano, T., Komatsu, N., ... Miller-Rushing, A. J. (2016). Citizen science: a new approach to advance ecology, education, and conservation. *Ecological Research*, 31(1), 1-19. doi:10.1007/s11284-015-1314-y
- Koch, R., Almeida-Cortez, J. S. et Kleinschmit, B. (2017). Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: Combination of modelled plant diversity hot spots and threat patterns. *Journal for Nature Conservation*, 35(Supplement C), 24-39. doi:10.1016/j.jnc.2016.11.004
- Krasilchik, M. (2008). Caminhos do ensino de ciências no Brasil. *Em Aberto*, 11(55).
- Kullenberg, C. et Kasperowski, D. (2016). What Is Citizen Science? – A Scientometric Meta-Analysis. *PLOS ONE*, 11(1), e0147152. doi:10.1371/journal.pone.0147152
- Le Houérou, H. N. (2006). Le milieu naturel, la végétation, les parcours, le bétail et la stratégie antisécheresse dans le Nordeste brésilien. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17(1), 275–287.
- Leal de Oliveira, M. B., Barbosa Santos, A. J., Manzi, A. O., Alvalá, R. C. dos S., Silva Correia, F. W. et Beserra de Moura, M. S. (2006). Trocas de energia e fluxo de carbono entre vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21. Repéré à https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/123/5971/1/TROCAS_DE_ENERGIA_E_FLUXO.pdf
- Leal, Inara R., Da Silva, J. M. C., Tabarelli, M. et Lacher, T. E. (2005). Changing the Course of Biodiversity Conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. *Conservation Biology*, 19(3), 701-706. doi:10.1111/j.1523-1739.2005.00703.x
- Leal, Inara Roberta, Tabarelli, M. et Silva, J. M. C. da. (2003). *Ecologia e conservação da caatinga*. Editora Universitária UFPE.

- LEO Network. (2017). Local Environmental Observer (LEO) Network. Repéré à <https://www.leonetwork.org/fr/#lat=-26.105234474652026&lng=28.09952974319458&zoom=7>
- LERU, L. of E. R. U. (2016, octobre). Citizen science at Universities : Trends, guidelines and recommendations. Repéré à <https://www.leru.org/files/Citizen-Science-at-Universities-Trends-Guidelines-and-Recommendations-Full-paper.pdf>
- Loyola, R. D., Lemes, P., Faleiro, F. V., Trindade-Filho, J. et Machado, R. B. (2012). Severe Loss of Suitable Climatic Conditions for Marsupial Species in Brazil: Challenges and Opportunities for Conservation. *PLoS ONE*, 7(9), e46257. doi:10.1371/journal.pone.0046257
- Lucena, R. F. P. de, Nascimento, V. T. do, Araújo, E. de L. et Albuquerque, U. P. de. (2008). Local Uses of Native Plants in an Area of Caatinga Vegetation (Pernambuco, NE Brazil). *Ethnobotany Research and Applications*, 6(0), 003-014. doi:10.17348/era.6.0.3-14
- Lukyanenko, R., Wiggins, A. et Rosser, H. K. (2019). Citizen Science: An Information Quality Research Frontier. *Information Systems Frontiers*. doi:10.1007/s10796-019-09915-z
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., S. Buckeridge, M., Castellanos, E., Poveda, G., ... Vicuna, S. (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Central and South America. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 68.
- Mamede, S., Benites, M. et Alho, C. J. R. (2017). Ciência cidadã e sua contribuição na proteção e conservação da biodiversidade na reserva da biosfera do Pantanal. *Revista brasileira de educação ambiental*, 12(4), 153-164.
- Marengo, J. A. (2008). Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, 13(27), 149-176.
- Maruani, T. et Amit-Cohen, I. (2009). The effectiveness of the protection of riparian landscapes in Israel. *Land Use Policy*, 26(4), 911-918.
- Massarani, L. (2012). Comunicação da ciência e apropriação social da ciência: algumas reflexões sobre o caso do Brasil. *Uni-pluriversidad*, 12(3), 92-100.
- Mathieu, D. (2011). Observer la nature, une problématique "science citoyenne" ? *Association Forêt Méditerranéenne*. Repéré à http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/47115/FM_XXXII-2_115-118.pdf?sequence=1
- Meeus, B. (2019). Politiques environnementales au Brésil : analyse historique et récents développements sous Jair Bolsonaro. *La Pensee écologique*, N° 4(2), 45-61.

- Météo France, IGN, CNES et Etalab. (2015). C3 Challenge. *C3 Challenge*. Repéré à <http://c3challenge.com/>
- Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., ... Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491-505. doi:10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x
- Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur Québec. (2019). Le système scolaire québécois. Repéré à <http://www.education.gouv.qc.ca/references/etudier-au-quebec/systeme-scolaire-quebecois/>
- Ministère Immigration, Diversité et Inclusion Québec. (2018). Le système scolaire québécois. Repéré à <https://www.immigration-quebec.gouv.qc.ca/fr/immigrer-installer/etudiants/informer/systeme-quebecois.html>
- Ministério da Educação. (2018). Ministério da Educação. Repéré à <http://portal.mec.gov.br/index.php/>
- Ministério do Meio Ambiente. (2017). Caatinga. Repéré à <http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>
- Ministério do Meio Ambiente, -MMA. (2010). Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite acordo de cooperação técnica mma/ibama : monitoramento do bioma caatinga 2002 a 2008. Repéré à http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatrio_tcnico_caatinga_72.pdf
- MMA. (2018a). Educação Ambiental Por um Brasil Sustentável, 104.
- MMA. (2018b). Programa Nacional de Educação Ambiental. Repéré à <https://www.mma.gov.br/educacao-ambiental/politica-de-educacao-ambiental/programa-nacional-de-educacao-ambiental>
- MMA, Secretaria de Recursos Hídricos, Universidade Federal da Paraíba et Santana, M. O. (2007). Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil. *Brasília: MMA/SRH/UFPB*, 136.
- Montenegro, A. et Ragab, R. (2010). Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrological Processes*, 24(19), 2705-2723. doi:10.1002/hyp.7825
- Muséum national d'Histoire naturelle. (2018, 15 juin). 65 millions d'Observateurs. *Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation (CESCO)*. Repéré à <http://cesco.mnhn.fr/fr/65-millions-dobservateurs-6094>
- Muséum national d'Histoire naturelle. (2019). Vigie-Nature. *Vigie-Nature*. Repéré à <http://www.vigienature.fr/fr>

- Muséum national d'Histoire naturelle, Canopé Paris et Natureparif. (2019). Vigie-Nature École : un réseau d'élèves qui fait avancer la science. Repéré à <https://www.vigienature-ecole.fr/>
- NABA. (2017). North American Butterfly Association : Butterfly Counts. Repéré à https://www.naba.org/butter_counts.html
- Office québécois de la langue française. (2014). Science citoyenne. Le grand dictionnaire terminologique (GDT) de l'Office québécois de la langue française. Repéré à http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26529714
- Oliveira, G. de, Araújo, M. B., Rangel, T. F., Alagador, D. et Diniz-Filho, J. A. F. (2012). Conserving the Brazilian semiarid (Caatinga) biome under climate change. *Biodiversity and Conservation*, 21(11), 2913-2926. doi:10.1007/s10531-012-0346-7
- Oliveira, H. R. et Cassemiro, F. A. S. (2013). Potenciais efeitos das mudanças climáticas futuras sobre a distribuição de um anuro da Caatinga *Rhinella granulosa* (Anura, Bufonidae). *Iheringia. Série Zoologia*, 103(3), 272-279. doi:10.1590/S0073-47212013000300010
- Pacheco, A. da P. (2017). Télédétection appliquée à l'étude du biome Caatinga : une revue de la littérature. *Ciência & Trópico*, 41(2). Repéré à <https://fundaj.emnuvens.com.br/CIC/article/view/1654>
- Parmesan, C. et Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42. doi:10.1038/nature01286
- Pereira, A. S. et Rovere, E. L. L. (2019, 20 septembre). Paradoxes du Brésil face aux changements climatiques. *CETRI, Centre Tricontinental*. Repéré à <https://www.cetri.be/Paradoxes-du-Bresil-face-aux>
- Pereira Júnior, L. R., Andrade, E. M. de, Palácio, H. A. de Q., Raymer, P. C. L., Ribeiro Filho, J. C. et Pereira, F. J. S. (2016). Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. *REVISTA CIÊNCIA AGRÔNOMICA*, 47(1). doi:10.5935/1806-6690.20160004
- Piégay, H., Pautou, G. et Ruffinoni, C. (2003). *Les forêts riveraines des cours d'eau: écologie, fonctions et gestion*. Forêt privée française.
- Pinheiro, E., van Lier, Q. et Bezerra, A. (2017). Hydrology of a Water-Limited Forest under Climate Change Scenarios: The Case of the Caatinga Biome, Brazil. *Forests*, 8(3), 62. doi:10.3390/f8030062
- Powers, J. S., Corre, M. D., Twine, T. E. et Veldkamp, E. (2011). Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(15), 6318-6322. doi:10.1073/pnas.1016774108

- Praia, J., Gil-Pérez, D. et Vilches, A. (2007). O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania. *Ciência & Educação (Bauru)*, 13(2), 141-156. doi:10.1590/S1516-73132007000200001
- Programme REPERE. (2016). SURVIVORS, un projet de recherches participatives avec des collégiens sur le changement climatique. Repéré à <http://www.programme-repere.fr/repere2015/projets-ami/survivors/>
- Raimbert, C. (2018). La gouvernance environnementale brésilienne à l'épreuve des communautés quilombolas : conquêtes nouvelles, ambiguïtés persistantes. *Brésil(s). Sciences humaines et sociales*, (13). doi:10.4000/bresils.2522
- Reef Check. (2019). Reef Check - Saving Reefs Worldwide. Repéré à <http://www.reefcheck.org/ecodiver/about-ecodiver/>
- Réseau Action Climat France. (2014). Le 5ème rapport du GIEC décrypté. Repéré à <http://leclimatchange.fr/>
- Ricardo, V. P. (2008). Projecto de recuperação das matas ciliares.
- Rito, K. F., Arroyo-Rodríguez, V., Queiroz, R. T., Leal, I. R. et Tabarelli, M. (2017). Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. *Journal of Ecology*, 105(3), 828-838. doi:10.1111/1365-2745.12712
- Rodrigues, P., Silva, J., Eisenlohr, P. et Schaefer, C. (2015). Climate change effects on the geographic distribution of specialist tree species of the Brazilian tropical dry forests. *Brazilian Journal of Biology*, 75(3), 679-684. doi:10.1590/1519-6984.20913
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C. et Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918), 57-60. doi:10.1038/nature01333
- Salvatierra, L. H. A., Ladle, R. J., Barbosa, H., Correia, R. A. et Malhado, A. C. M. (2017). Protected areas buffer the Brazilian semi-arid biome from climate change. *Biotropica*, 49(5), 753-760. doi:10.1111/btp.12459
- Santos, J. C., Leal, I. R., Almeida-Cortez, J. S., Fernandes, G. W. et Tabarelli, M. (2011). Caatinga: The Scientific Negligence Experienced by a Dry Tropical Forest. *Tropical Conservation Science*, 4(3), 276-286. doi:10.1177/194008291100400306
- Santos, M. G., Oliveira, M. T., Figueiredo, K. V., Falcão, H. M., Arruda, E. C. P., Almeida-Cortez, J., ... Antonino, A. C. D. (2014). Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 26(1), 83-99. doi:10.1007/s40626-014-0008-0
- Save Brasil. (2019). Cidadão Cientista. Repéré à <http://www.savebrasil.org.br/cidadao-cientista/>

- Schnell, R. (1966). Problèmes phytogéographiques, écologiques et économiques de la Caatinga brésilienne. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 13(1), 59-90. doi:10.3406/jatba.1966.2871
- Schulz, K., Guschal, M., Kowarik, I., Almeida-Cortez, J. S., Sampaio, E. V. S. B. et Cierjacks, A. (2018). Grazing, forest density, and carbon storage: towards a more sustainable land use in Caatinga dry forests of Brazil. *Regional Environmental Change*, 18(7), 1969-1981. doi:10.1007/s10113-018-1303-0
- Seddon, A. W. R., Macias-Fauria, M., Long, P. R., Benz, D. et Willis, K. J. (2016). Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 531(7593), 229-232. doi:10.1038/nature16986
- Siegmund-Schultze, M., do Carmo Sobral, M., Alcoforado de Moraes, M. M. G., Almeida-Cortez, J. S., Azevedo, J. R. G., Candeias, A. L., ... Köppel, J. (2018). The legacy of large dams and their effects on the water-land nexus. *Regional Environmental Change*, 18(7), 1883-1888. doi:10.1007/s10113-018-1414-7
- Silva, A. A. da. (2002). Uso e conservação de um remanescente de caatinga arbórea no município de Cajazeiras-PB: elementos para gestão ambiental.
- Silva, J. M. C. da, Leal, I. R. et Tabarelli, M. (2017). *Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America*. Repéré à <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5217711>
- Silva, P. F. da, Lima, J. R. de S., Antonino, A. C. D., Souza, R., Souza, E. S. de, Silva, J. R. I. et Alves, E. M. (2017). Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, 147, 71-82. doi:10.1016/j.jaridenv.2017.09.003
- Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 467-471. doi:10.1016/j.tree.2009.03.017
- Socientize. (2013). *Green Paper on citizen science, citizen science for Europe: Towards a better society of empowered citizens and enhanced research*. The Socientize Consortium of the European Commission.
- Souto, E. (2014, 14 septembre). Science participative : des applis pour mesurer le bruit et la pollution de l'air ! *consoGlobe*. Repéré à <https://www.consoglobe.com/science-participative-applis-cg>
- Souza, D. et Oyama, M. (2011). Climatic consequences of gradual desertification in the semi-arid area of Northeast Brazil. *Theoretical & Applied Climatology*, 103(3-4), 345-357. doi:10.1007/s00704-010-0302-y

- Souza, M. L., Duarte, A. A., Lovato, M. B., Fagundes, M., Valladares, F. et Lemos-Filho, J. P. (2018). Climatic factors shaping intraspecific leaf trait variation of a neotropical tree along a rainfall gradient. *PLOS ONE*, 13(12), e0208512. doi:10.1371/journal.pone.0208512
- Souza Nascimento, C. E. de. (2001). A importância das Matas ciliares do rio São Francisco. *Embrapa Semiárido-Docmentos (INFOTECA-E)*.
- Souza Nascimento, C. E. de, Tabarelli, M., da Silva, C. A. D., Leal, I. R., de Souza Tavares, W., Serrão, J. E. et Zanuncio, J. C. (2014). The introduced tree *Prosopis juliflora* is a serious threat to native species of the Brazilian Caatinga vegetation. *Science of The Total Environment*, 481, 108-113. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.019
- Souza, R., Feng, X., Antonino, A., Montenegro, S., Souza, E. et Porporato, A. (2016). Vegetation response to rainfall seasonality and interannual variability in tropical dry forests. *Hydrological Processes*, 30(20), 3583-3595. doi:10.1002/hyp.10953
- Spinoni, J., Vogt, J., Naumann, G., Carrao, H. et Barbosa, P. (2015). Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2210-2222. doi:10.1002/joc.4124
- Sullivan, B. L., Wood, C. L., Iliff, M. J., Bonney, R. E., Fink, D. et Kelling, S. (2009). eBird: A citizen-based bird observation network in the biological sciences. *Biological Conservation*, 142(10), 2282-2292. doi:10.1016/j.biocon.2009.05.006
- Tavares-Damasceno, J. P., de Souza Silveira, J. L. G., Câmara, T., de Castro Stedile, P., Macario, P., Toledo-Lima, G. S. et Pichorim, M. (2017). Effect of drought on demography of Pileated Finch (*Coryphospingus pileatus*: Thraupidae) in northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments*, 147, 63-70. doi:10.1016/j.jaridenv.2017.09.006
- Tea Bag Index. (2016). Teatime4Science. Repéré à <http://www.teatime4science.org/about/the-project/>
- Tela Botanica. (2019). Observatoire des Saisons. Repéré à <https://www.obs-saisons.fr/>
- The Conservation Volunteers, T. C. (2019). Shore Thing project [Text]. TCV. Repéré à <https://www.tcv.org.uk/scotland/discover/citizen-science/scotland-counts/citizen-science-your-community/case-studies-community-based-projects/shore>
- The Cornell Lab of Ornithology. (2019). Global Big Day - eBird. Repéré à <https://ebird.org/globalbigday>
- Tolentino Neto, L. C. B. de. (2008). *Os interesses e posturas de jovens alunos frente às ciências: resultados do Projeto ROSE aplicado no Brasil*. (PhD Thesis). Universidade de São Paulo.

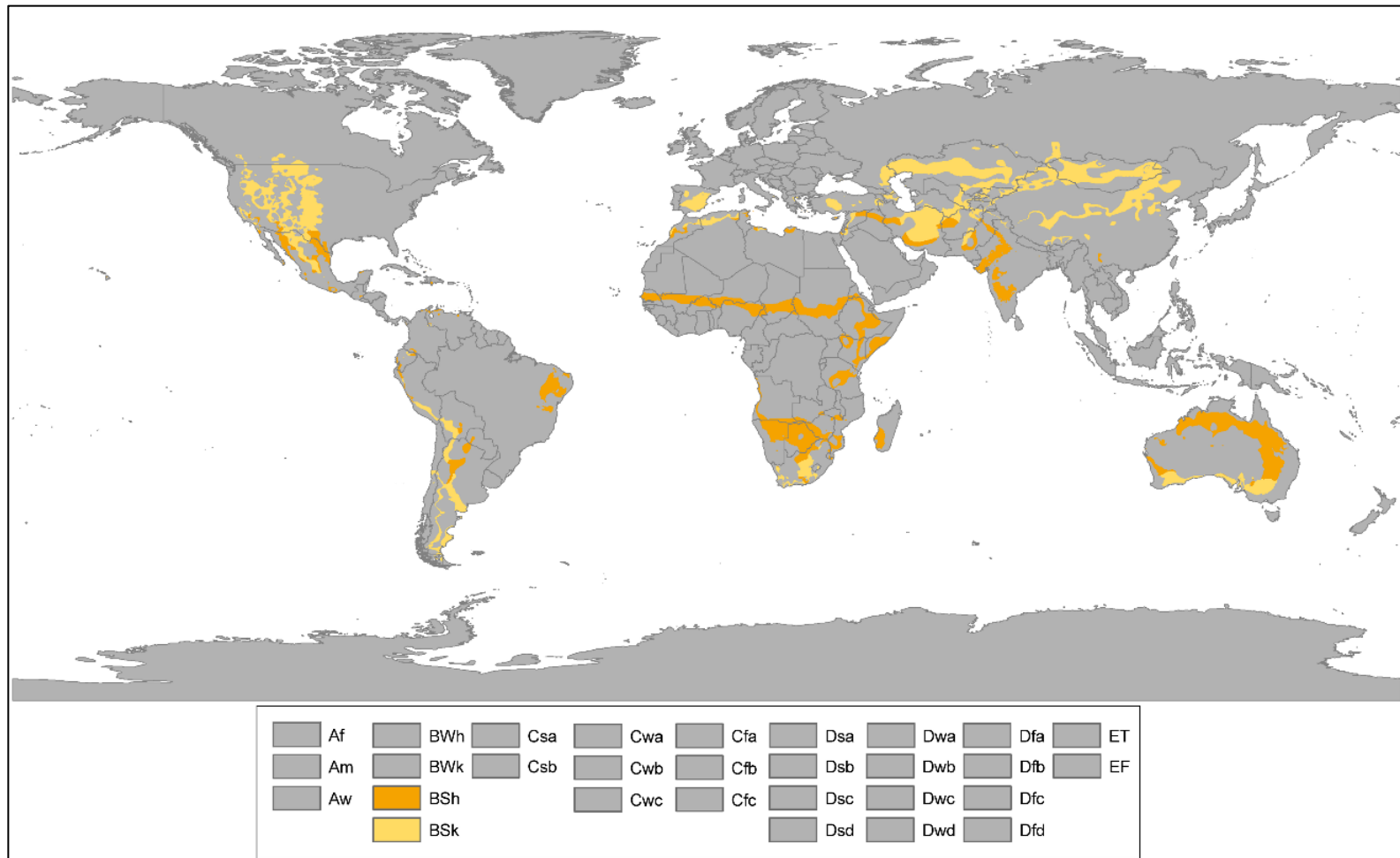
- UNEP. (1992). *World atlas of desertification*. Edward Arnold. Repéré à <http://ezproxy.usherbrooke.ca/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat04883a&AN=she.020052276&lang=fr&site=eds-live>
- University of Oxford, Oxford e-Research et Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics. (2019). climateprediction.net : The world's largest climate modelling experiment for the 21st century. Repéré à <https://www.climateprediction.net/>
- Vetenskap & Allmänhet. (2019). Mass experiments. *Vetenskap & Allmänhet*. Repéré à <https://v-a.se/english-portal/projects/activity-projects/researchers-night/mass-experiments/>
- Vieira, R. M. da S. P., Cunha, A. P. M. do A., Alvalá, R. C. dos S., Carvalho, V. C., Ferraz Neto, S. et Sestini, M. F. (2013). Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for meteorological and climatic models. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), 129-138. doi:10.1590/S0102-77862013000200002
- Vieira, R. M. S. P., Tomasella, J., Alvalá, R. C. S., Sestini, M. F., Affonso, A. G., Rodriguez, D. A., ... Santana, M. O. (2015). Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. *Solid Earth*, 6(1), 347-360. doi:10.5194/se-6-347-2015
- VigieNature. (2019). Vigie-Nature : Un réseau de citoyens qui fait avancer la science. *Vigie-Nature*. Repéré à <http://www.vigienature.fr/fr>
- Ward-Paige, C. A. (2018). eOceans. *eOceans*. Repéré à <https://www.eoceans.co/>
- Werneck, F. P., Costa, G. C., Colli, G. R., Prado, D. E. et Sites Jr, J. W. (2011). Revisiting the historical distribution of Seasonally Dry Tropical Forests: new insights based on palaeodistribution modelling and palynological evidence. *Global Ecology and Biogeography*, 20(2), 272–288.
- Wiggins, A. et Crowston, K. (2011). *From Conservation to Crowdsourcing: A Typology of Citizen Science*. Communication présentée au 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences (p. 1-10). doi:10.1109/HICSS.2011.207
- WikiAves. (2019). Wiki Aves: A Enciclopédia das Aves do Brasil. *Wiki Aves: A Enciclopédia das Aves do Brasil*. Repéré à <https://www.wikiaves.com.br/>
- Wilderman, C. C. (2007). *Models of community science: design lessons from the field*. Communication présentée au CITIZEN SCIENCE (p. 16).
- Wilderman, C. C., Barron, A. et Imgrund, L. (2004). Top Down or Bottom Up? ALLARM's Experience with Two Operational Models for Community Science, 13.
- WMO. (2001). *Volunteers for weather, climate and water*. Geneva : World Meteorological Organisation.

Zanin, M., Tessarolo, G., Machado, N. et Albernaz, A. L. M. (2017). Climatically-mediated landcover change: impacts on Brazilian territory. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 89(2), 939-952. doi:10.1590/0001-3765201720160226

Zooniverse. (2019). Galaxy Zoo. Repéré à <https://www.zooniverse.org/projects/zookeeper/galaxy-zoo>

Annexe 1

Climats semi-arides selon la classification de Köppen-Geiger



Carte de la classification des climats de Köppen-Geiger montrant les climats semi-arides (Bsh et Bsk) à l'échelle mondiale.
Source : Peel et al., (2011)

Annexe 2

Exemple de protocole du programme Phénoclim



PHÉNOCLIM

Les sciences participatives en
montagne



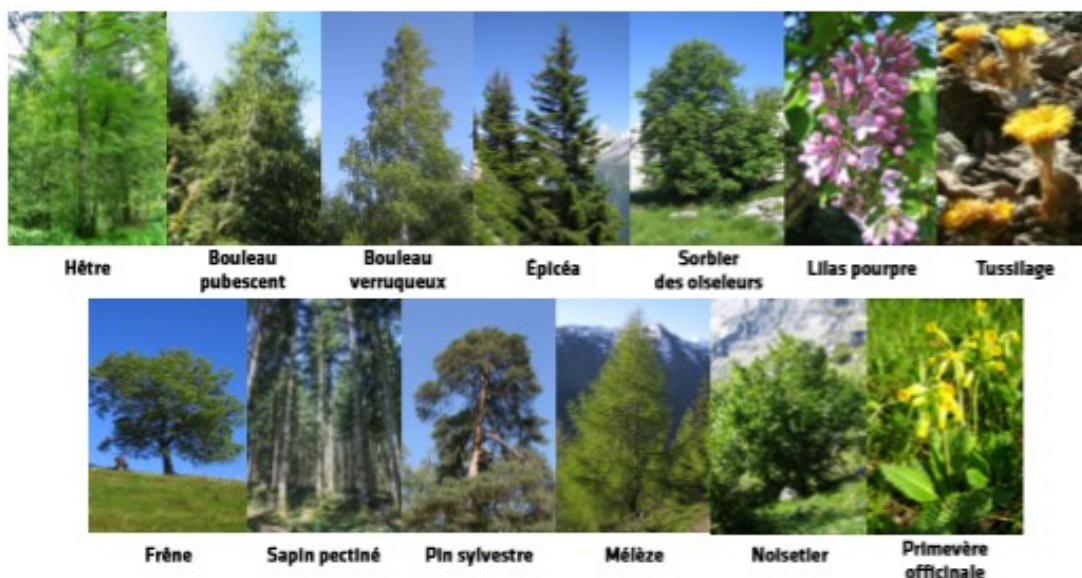
Fiche protocole : Suivre la végétation

Le programme en quelques mots

Participer à Phénoclim c'est observer et noter les différents stades de développement de la végétation au cours des saisons (printemps et automne). Parmi les 13 espèces de notre liste choisissez-en 3 à proximité de chez vous et dans un même secteur, c'est à dire dans un rayon de 500 mètres autour de chez vous.

Le choix des espèces

Choisissez 3 espèces parmi la liste



Choisissez 3 individus par espèce

Pour chaque espèce choisie, repérez au minimum 2 plantes (3 recommandées). Pour les herbacées, marquez 3 carrés de 1 m de côté dans lesquels il y a plusieurs plantes.

Marquez vos individus

Marquez les plantes de manière à pouvoir les retrouver au cours des saisons et d'une année sur l'autre. Donnez leur à chacune un nom ou un numéro.

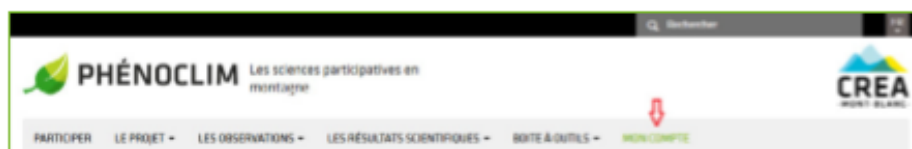
Vous pouvez par exemple placer un petit piquet en bois au pied de l'arbre avec son numéro ou déposer une marque de peinture discrète sur le tronc.

Enregistrer vos plantes sur votre espace personnel du site internet

Pour participer à Phénoclim il est nécessaire de se créer un compte sur le site internet Phénoclim :

Phenoclim.org

Pour cela cliquez sur l'onglet **Mon compte**.



Cette inscription vous permet de renseigner précisément la localisation de votre zone d'étude et des espèces que vous avez choisies.

L'identifiant et le mot de passe reçus par mail lors de votre inscription vous permettent d'accéder à votre espace personnel en cliquant sur **Mon compte**.

Pour une explication plus détaillée concernant l'inscription et l'enregistrement de la zone et des plantes : [consultez les tutos Youtube](#)

Faire vos observations



Rendez visite à vos plantes une fois par semaine au printemps et l'automne.

Observez vos espèces, lorsqu'un des stades à suivre est atteint : notez la date.

En cas de non observation d'un stade, différenciez et renseignez :

- « *stade absent* », si l'évènement n'a pas eu lieu cette année,
- « *stade déjà passé* », si vous n'avez pas pu faire l'observation et que le stade a déjà eu lieu (vacances, oubli...),
- « *individu mort ou disparu* », si l'arbre n'existe plus (tempête, coupe, arbre mort). Dans ce cas définissez un nouvel individu dans votre zone d'étude pour le remplacer. Attention : nommez ce nouvel individu différemment du précédent (exemple : arbre 4).

A savoir : il arrive certaines années qu'un événement phénologique n'ait pas lieu. Par exemple, les frênes ne fleurissent pas tous les ans. Dans ce cas notez « *stade absent* ».

Au printemps

Commencez les observations aux premiers signes de réveil de la végétation. Trois stades sont à observer : le débourrement, la feuillaison, la floraison. Attention : l'ordre d'apparition des différents stades varie selon les espèces.

Pour connaître la chronologie détaillée des événements phénologiques de chaque espèce, consultez le calendrier indicatif dans la [Boîte à Outils](#).

Le débourrement

Le débourrement correspond à l'ouverture des bourgeons végétatifs (ceux qui donnent les feuilles). Les nouvelles feuilles sont visibles à travers les écailles du bourgeon.

Notez le stade débourrement quand 10% des bourgeons de l'arbre sont en phase d'ouverture.

La feuillaison

La feuillaison correspond à l'ouverture des nouvelles feuilles. La feuille est entièrement ouverte, le pétiole («queue» de la feuille) apparent et la forme reconnaissable même si la feuille n'a pas sa taille adulte.

Notez le stade feuillaison quand 10% des feuilles de l'arbre sont formées.

Pour les conifères, les jeunes aiguilles sont collées à la base du bourgeon, mais séparées au sommet.



J'observe

La floraison

Les pétales sont suffisamment ouverts pour laisser voir l'intérieur de la fleur.

Notez le stade floraison quand 10% des fleurs sont ouvertes.

La floraison diffère en fonction des espèces :
Pour le lilas, le sorbier et le frêne, notez l'ouverture de la première fleur de l'inflorescence (grappe), où sont logées les fleurs mâles et femelles.

Pour le noisetier, le bouleau, l'épicéa et le mélèze, notez la libération du pollen par les fleurs mâles (châtons).

Pour avoir plus de précisions sur les différents stades à observer pour chacune de vos espèces, consultez le document *Fiche espèces flore* qui comporte une fiche détaillée pour chaque espèce, dans la Boîte à Outils.

A l'automne

Commencez les observations lorsque les premières feuilles changent de couleur.
Deux stades sont à observer : le début et la moitié du changement de couleur.
Pour connaître la chronologie détaillée des événements phénologiques de chaque espèce, consultez le calendrier indicatif dans la [Boîte à Outils](#).

Le début de changement de couleur

Notez la date à laquelle les premières feuilles de l'arbre, soit environ 10% du feuillage, ont changé de couleur.

Moitié de changement de couleur

Notez la date à laquelle la moitié des feuilles de l'arbre, soit environ 50% du feuillage, ont changé de couleur.



Attention : dans les deux cas les feuilles qui sont déjà tombées au sol comptent dans le pourcentage observé puisque l'on considère l'ensemble du feuillage.

J'observe

Comment noter et transmettre mes observations

Une fois vos observations réalisées, il est primordial de nous les communiquer rapidement.

Avec l'application mobile Android



L'application mobile vous permet de saisir vos observations sur le terrain à l'aide de votre tablette ou smartphone. Des photographies des différents stades à observer s'affichent lors de la saisie sur le terrain afin de vous guider.



Dès que vous avez une connexion internet, synchronisez vos données entre votre smartphone et le site internet, avant et après la saisie de vos observations afin d'avoir toutes vos données à jour sur votre tablette.

Saisie via le site internet

Une fois vos relevés effectués sur le terrain connectez-vous à votre espace personnel en cliquant sur **Mon compte** sur le site internet phenoclim.org.
Rentrez ensuite vos données en cliquant sur l'onglet «saisir mes observations».
Pour plus de précision : consultez le tutoriel vidéo [saisir mes observations](#).

Visualisez et comparez vos observations avec celles des autres observateurs à travers des modules interactifs simples d'utilisation sur la page [Les observations de la flore](#).

Annexe 3

Exemples de documents d'aide pour les participants

Exemple de fiche d'identification d'espèce



www.obs-saisons.fr
www.obs-saisons.fr/junior

Mélèze commun

Larix decidua Mill.

Mélèze d'Europe, Pin de Briançon

Pinaceae

Comment le reconnaître ?

Arbre (1) de 30 à 40 m de hauteur, au port pyramidal, à cime longue, irrégulière et clairsemée. **Tronc** droit, **rameaux** tombants fins et souples, jaune blanchâtre à gris.

Écorce (2) brune-verte et lisse au début, puis marron-rouge et brune-grise, profondément fissurée et crevassée, épaisse sur les arbres âgés.

Bourgeons (3) terminaux aux rameaux, longs et ovoïdes, brun doré.

Aiguilles (4) caduques, molles et flexibles, 15-25 mm, groupées en touffe sur des rameaux courts ou isolément sur des rameaux longs. Vertes claires, à 3 faces et possèdent sur la face inférieure 2 bandes plus claires, grisâtres : les stomates pour la respiration.

Fleurs en chatons mâles (5) jaunes clairs, globuleux, petits, nombreux et pendants sur les rameaux courts sans aiguilles. **Chatons femelles (5')** moins nombreux et un peu plus grands, rouge vif, et dressés sur les rameaux courts avec aiguilles.

Cônes dressés, ovoïdes, à écailles appliquées, rouge (6) puis brun clair (6'), 2-4 cm. Ils restent longtemps attachés sur l'arbre. Graines ailées.

Quels sont ses usages et propriétés?

- Le nom mélèze est d'origine dauphinoise. *Larix* vient de son nom gaulois et *decidua* car il est à feuilles caduques.
- Bois imputrescible donc utilisé pour l'extérieur.
- Sert aussi à reboiser nos massifs montagneux comme les Pyrénées.
- Les aiguilles fournissent une substance purgative.
- La résine fournit la térébenthine de Venise.

Où vit il?

- Endémique des Alpes et présent dans les montagnes d'Europe Centrale.
- Croît entre 1200 et 2400 mètres, il aime le froid.
- Pied au frais et tête au soleil (versant nord des montagnes).
- Espèce pionnière, il vient là où le pastoralisme a détruit la végétation.
- Sensible à la pollution, et indifférent aux divers types de sols, il apprécie tout de même les sols peu évolués.
- Seul conifère d'Europe qui perd ses aiguilles en hiver.
- Il peut vivre jusqu'à 500 ans.

Aire de répartition



Légende


- Zone géographique non renseignée
- Présente
- Présence non signalée

Calendrier Phénologique

	jan	févr	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Feuilles												
Fleurs												
Fruits												

Source : Tela Botanica, (2019)





Exemple de fiche d'identification de différents stades (feuillaison floraison, fructification, etc.)







- Le mélèze -

Larix decidua Mill.



Feuillaison

Stade 0 Bourgeon dormant	Stade 7 Début de l'éclatement des bourgeons	Stade 9 Bout des feuilles sorties du bourgeon	Stade 11 Environ 10% des feuilles étalées	Stade 15 Environ 50% des feuilles étalées
				


Floraison

Stade 55 Fleurs mâles visibles non épanouies	Stade 61 Environ 10% des fleurs mâles libèrent le pollen	Stade 65 Environ 50% des fleurs mâles libèrent le pollen	Stade 69 Les fleurs mâles commencent à se faner	Fleurs femelles
				

Fructification

Stade 79 Les fruits ont atteint leur taille maximale	Stade 85 Au moins 50% des fruits sont matures
	

Sénescence

Stade 91 Environ 10% des feuilles ont commencé à changer de couleur	Stade 95 Environ 50% des feuilles ont commencé à changer de couleur
	


Stades phénologiques à observer

www.obs-saisons.fr

Source : Tela Botanica, (2019)

96

Exemple de tableau d'observation à compléter

TABELA DE MONITORAMENTO			
Cemaden Educação – Rede de escolas e comunidades na prevenção de riscos de desastres			
Atividade: Pluviômetros: monitoramento e alertas de chuvas			
Nome da escola:			
Localização:			
Mês/Ano:			
Dia	Hora da coleta	Chuva (mm)	Eventos especiais (cheias, inundações, deslizamentos, queda de encostas, incêndios).
01			
02			
03			
04			
05			
06			
07			
08			
09			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			

Source : Cemaden, (2019)

Annexe 4

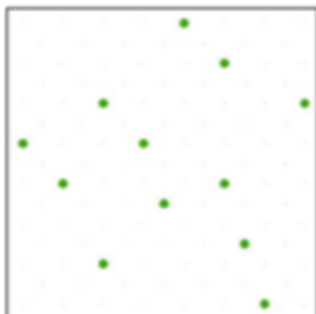
Exemples d'exercices d'entraînement pour les participants



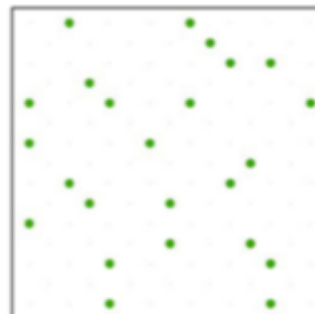
Combien de bourgeons ont éclaté ?
Imaginez que le carré symbolise un arbre, et les points verts des bourgeons ...



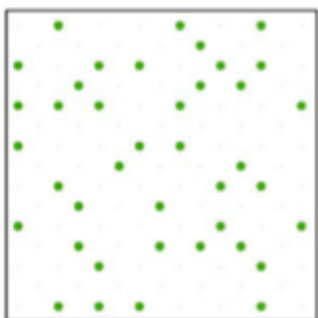
A



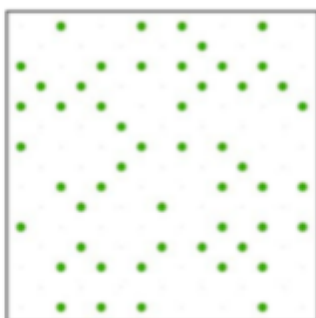
B



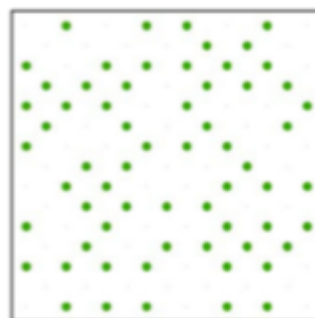
C



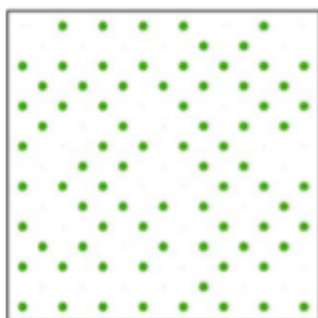
D



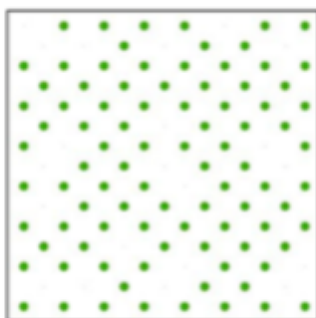
E



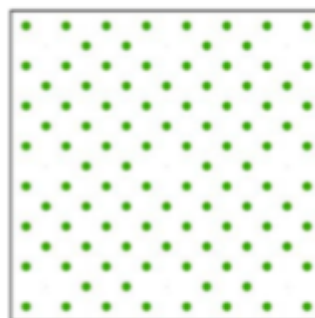
F



G



H



I

Réponses : A : 0% - B : 10% - C : 25% - D : 33% - E : 50% - F : 66% - G : 75% - H : 90% - I : 100%



www.obs-saisons.fr

Observatoire des Saisons

Exercices • ODS

Donnez, en pourcentage, la progression de la floraison de l'amandier :



A



B



C



D



E



F

Réponses : A : 5% - B : 10% - C : 20% - D : 40% - E : 50% - F : 80%

Source : Tela Botanica, (2019)



www.obs-saisons.fr

Observatoire des Saisons

Exercices • ODS

Évaluer le pourcentage de coloration des feuilles des arbres :

bouleau :



A



B

mélèze :



C



D



E

sorbier :



F



G



H

Réponses : A : 50% - B : 100% - C : 20% - D : 70% - E : 100% - F : 10% - G : 60% - H : 100%

Source : Tela Botanica, (2019)